

粗粒土回弹特性试验研究

朱俊高^{1,2}, 王元龙^{1,2}, 贾华³, 张博^{1,2}

(1. 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098;

3. 山东诚基工程建设有限公司, 山东 青岛 266000)

摘要: 对2种粗粒土4种级配料进行了卸载-再加载的三轴固结排水剪试验, 比较分析其强度变形特性与单调加载三轴试验条件下特性的差异。重点研究不同试验粗粒料的回弹模量取值规律, 分析了回弹模量与初始模量、围压和应力水平等之间的关系。结果表明, 围压对回弹模量影响较大而应力水平的影响相对较小; 粗粒土的回弹模量约为初始模量的2.5~5.0倍, 比目前对黏土等认识的1.5~3.0倍明显大。试验结果为邓肯-张模型等非线性弹性模型甚至弹塑性模型的回弹模量的合理取值提供了重要试验依据。

关键词: 粗粒土; 三轴试验; 加卸载; 回弹模量

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2011)06-0950-05

作者简介: 朱俊高(1964-), 男, 江苏兴化人, 教授, 主要从事土体本构关系、土石坝工程研究。E-mail: zhujungao@hhu.edu.cn

Experimental study on resilience behaviour of coarse grained soils

ZHU Jun-gao^{1,2}, WANG Yuan-long^{1,2}, JIA Hua³, ZHANG Bo^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geo-mechanics and Embankment Engineering, Nanjing 210098, China; 2. Geotechnical Research Institute of Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Shandong Chengji Engineering Construction Co., Ltd., Qingdao 266000, China)

Abstract: A number of unloading and reloading triaxial CD tests on two kinds of coarse grained soils with 4 types of grain distribution are performed. The differences of behaviour of strength and stress-strain between the test results from monotonic loading CD tests and unloading-reloading CD tests are analyzed. The value of resilience modulus for different soils is investigated, and the relationships among the modulus of resilience, the initial Young's modulus, the confining pressure and the stress level are analyzed. It is found that the confining pressure influences the modulus of resilient evidently, and the effect of stress level on it is not so strong. The modulus of resilient of coarse grained soil is about 2.5~5.0 times the initial Young's modulus, and is much greater than that of 1.5~3.0 times which is known for clays. The present findings provide an important support for the determination of the modulus of resilience for Duncan-Chang model or other elasto-plastic models.

Key words: coarse grained soil; triaxial test; unloading and reloading; modulus of resilience

0 前 言

粗粒土通常是指块石、碎石、石粉和石屑等粗颗粒组成的无黏性混合土或黏性土中含有大量粗颗粒的混合土。粗粒土具有优良的工程特性, 广泛应用于土石坝填筑、路基加固、建筑物软弱地基处理等工程中。在土石坝中, 粗粒土(如堆石料、砂卵石料、掺砾心墙料等)作为主要筑坝材料, 在坝体体积中占有相当大的比重。因此, 对堆石料的受力变形特性准确把握无疑对预估整个土石坝的工作性态十分重要。

近年来, 中国高土石坝发展迅速, 对堆石料力学性质深入了解提出了更高要求。正因为如此, 对粗粒土力学特性的研究成为近年来一个重要研究热点。

对黏性土或砂土, 其回弹特性研究较多^[1-2]。对粗粒土, 加载条件下的强度变形性质研究也很多。这些研究中, 以普通三轴加载条件居多^[3-6], 也有利用轴对称三轴仪进行的复杂应力路径条件下的试验^[7-8]。相比之下, 对粗粒土回弹性质研究较少^[9-10]。因而, 对粗粒土回弹性质的认识, 主要是基于黏土或砂土的认识。

一般情况下, 加载对土体的变形影响较大, 从而

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项目(50639050); 国家自然科学基金项目(50809023); 水利部公益性行业科研专项项目(200801133); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20070294002)

收稿日期: 2010-01-15

对土工结构应力变形影响较大, 而卸载或回弹对土工结构的变形影响较小。因此, 土体卸载或回弹性质对土工结构应力变形的影响常常不被重视。事实上, 在有些情况下, 卸载或回弹也可能对结构产生较大影响, 如土工结构中有混凝土等刚性较大的结构时, 土体的回弹性质的准确反映与否则可能对混凝土应力变形的分析有较大影响。另外, 对 200 m 甚至 300 m 级高坝, 回弹性质的合理反映对准确分析其应力变形性质也很重要。因此, 要全面了解粗粒土应力变形特性, 回弹条件下的变形性质是一个不可缺少的重要方面。

本文对 2 种粗粒土 4 种级配料进行了普通三轴试验条件下的加载和卸载试验, 研究粗粒土在回弹条件下的变形性质。由于邓肯模型常用于堆石料的应力变形分析, 因此, 本文同时结合邓肯模型参数, 研究回弹模量的规律。

1 试验土料及试验方案

试验采用 2 种不同粗粒土, 分别是双江口心墙坝堆石料及长河坝心墙堆石坝覆盖层砂卵石料。所有试验均为饱和固结排水剪试验, 试验依据文献[11]。

双江口堆石坝的坝壳堆石料为似斑状黑云母钾长花岗岩, 岩石呈灰白色, 块状~片麻状构造, 颗粒比较均匀。长河坝心墙堆石坝的覆盖层料为砂卵石料, 颗粒圆滑, 少有棱角, 强度高, 不易破碎。

三轴固结排水剪试验试样直径 101 mm, 高度 200 mm。对双江口堆石料采用混合法 (HH)、等量替代法 (DT)、相似级配法 (XJ)^[11] 对原级配进行缩尺得试验用 3 种级配粗粒土 (编号见表 1, 级配曲线见图 1), 最大粒径 20 mm。长河坝覆盖层试验用料的级配参照 HH 料取用, 级配曲线也示于图 1。

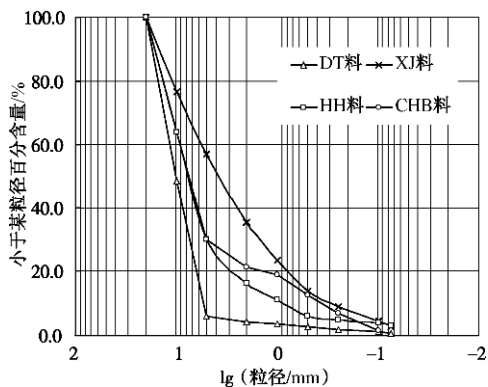


图 1 试验用粗粒土级配

Fig. 1 Particle size gradation of coarse grained soils

三轴试验的试样采用击实法制样, 控制相对密度为 0.9, 试样实际干密度见表 1。试验采用常规三轴仪应变控制式加载, 水头饱和方式进行试样饱和。加载阶段剪切速率 0.2 mm/min。卸载和再加载阶段为 0.05

mm/min。值得指出, 本文所指的加载指三轴试验的轴向压缩的过程, 卸载或回弹是指试样加载到一定应力水平后, 轴向荷载逐渐减小; 荷载减小到一定应力水平后再加荷但并未超过前期应力水平的情况则称为再加载。试验围压 s_3 分别为 200, 500, 800, 1200 kPa。

表 1 试验用粗粒土物理性质

Table 1 Properties of coarse grained soils for tests				
试验土料 编号	制样密度 /(g·cm ⁻³)	r_{dmax} /(g·cm ⁻³)	r_{dmin} /(g·cm ⁻³)	备注
DT	1.90	1.99	1.37	双江口料等量替代法
XJ	2.10	2.16	1.67	双江口料相似级配法
HH	1.97	2.03	1.56	双江口料混合法
CHB	2.17	2.23	1.76	长河坝料

用上述 4 种级配的粗粒土首先进行了常规三轴固结排水剪 (单调加载, 即不作卸载回弹) 试验。然后, 又对 4 种粗粒土分别进行卸载 - 再加载试验。目的是将单调加载试样的强度与卸载 - 再加载过程的试样强度进行比较。

对卸载 - 再加载试验, 先剪切到预定应力水平 S , 后将轴向附加应力卸载至 0, 然后, 再加载到更高应力水平后再卸载, 如此反复。这里, 预定应力水平为 $S = 0.25, 0.5, 0.7, 0.9$ 。应力水平 S 定义为试样在某围压下当前的轴向附加应力 ($s_1 - s_3$) 与该围压下试样达到剪切破坏时的轴向附加应力 ($s_1 - s_3$)_r 之比。

2 试验成果与分析

图 2 (a)、(b) 给出了围压 500, 1200 kPa 下 4 个不同应力水平 S 时卸载 - 再加载的轴向附加应力 ($s_1 - s_3$) - 轴向应变 e_1 - 体积应变 (简称体变) e_v 曲线。其它围压下的应力应变关系曲线与此类似, 这里不再列出。

从图 2 (a) 可以看出, 卸载曲线与再加载曲线并不重合, 两者之间有一个环, 称为回滞环。回滞环的出现说明卸载回弹并不是完全弹性变形, 再加载会产生新的塑性变形。图中, 不同应力水平对应的回滞环近乎平行, 表明不同应力水平下回弹模量变化不大, 后面具体的数据分析也表明了这一点。

试验结果还表明, 卸载段非线性较明显, 再加载段的线性关系则很好。

图 2 (b) 以及其它试验的结果表明: 试样卸载过程中, 其体积应变的规律受开始回弹时的应力水平影响较大。低应力水平 ($S=0.25$ 或 0.5) 时卸载, 试样表现为轻微体积膨胀或体积维持不变; 但高应力水平

($S=0.7$ 或 0.9)时卸载, 试样表现为明显的体缩, 卸载体缩量随着应力水平的增大而增大。

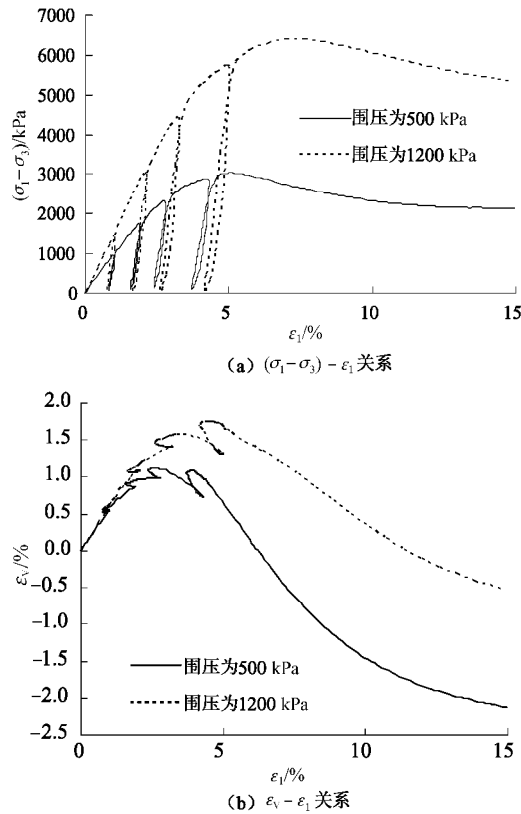


图2 (s_1-s_3) - e_1 - e_v 关系曲线

Fig. 2 Relationship among (s_1-s_3), e_1 and e_v

引起上述两种现象的原因应该是试样颗粒在(轴向应力)卸载试验中能得一次调整并重新排列的机会。重新排列后的试样比同样应力状态的单调加载试样更密实, 所以剪胀性相应变强, 且强度提高。作者曾进行HH料的常规三轴单调加载试验, 并将其结果与进行卸载一再加载试验结果比较。研究发现经过卸载再加载后, 应力状态回到开始回弹的应力点, 对试样继续加载, 试样的体变比单调加载情况的剪缩量小或者有更小的剪胀量, 卸载再加载的试样强度比单调加载试样强度高。由此可见, 卸载-再加载对粗粒土的体变及强度影响较大。

另外, 卸载体缩量随围压的大小而明显变化。在本文的试验围压范围内, 相同应力水平下, 围压从200 kPa增大到800 kPa时, 随着围压的增大, 卸载体缩量增大。但是, 围压再继续增大时, 卸载体缩量反而减少。卸荷体缩是土体常见的性质, 不少学者在黏土或砂土中都观测到这种现象^[12-13]。

为研究回弹变形量相对大小, 图3整理了4种料不同围压不同应力水平下回弹应变占回弹开始前总应变的百分比。从图3中可以看出, 随应力水平的提高, 弹性应变占总应变的比例在明显减小, 但是, 相同应力水平下弹性应变占比随围压的变化关系不明显。对

不同土料, 弹性应变占总应变的比例差异较大。

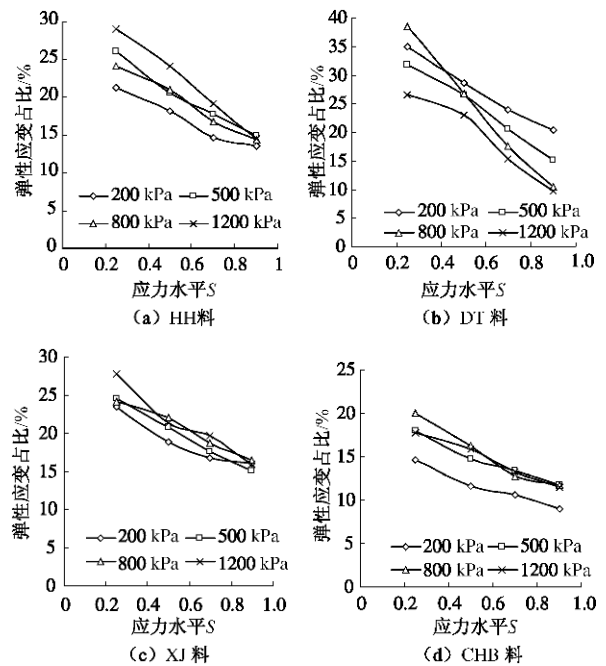


图3 不同围压下弹性应变占总应变百分比随应力水平变化
Fig. 3 Relationship between percentage of elastic strain and stress level under different confining pressures

下面具体分析粗粒土回弹模量大小变化规律。

利用三轴 CD 试验的卸载和再加载时的轴向应力 s_1 和轴向应变 e_1 值, 回弹模量 E_{ur} 的计算式为

$$E_{ur} = \Delta s_1 / \Delta e_1 = \Delta(s_1 - s_3) / \Delta e_1 \quad (1)$$

实际上, 三轴试验的卸载-再加载过程中(s_1-s_3)- e_1 曲线一般出现回滞环。因此, 用回滞环范围内测得的试验点进行线性拟合, 其直线斜率作为卸载-再加载模量, 以下统称回弹模量。

目前, 针对粗粒土, 最常用的本构模型是邓肯-张模型, 其回弹模量用下式计算:

$$E_{ur} = K_{ur} p_a (s_3 / p_a)^{n_{ur}} \quad (2)$$

式中 K_{ur} , n_{ur} 为回弹模量参数; p_a 为大气压力。实际应用时, 多是参照一般黏土或砂土将回弹模量取为初始弹性模量(简称初始弹模)的1.2~3倍^[14]。其中, 初始弹模表示为

$$E_i = K p_a (s_3 / p_a)^n \quad (3)$$

式中, K , n 为模型参数, 也有称模量数。因而, 意味着 $K_{ur} = (1.2 \sim 3)K$, $n_{ur} = n$ 。对粗粒土, 这样取值是否合适, 相关研究很少, 下面进行分析讨论。

根据前面的卸载-再加载试验, 整理出了双江口坝3种级配料(HH, XJ, DT)和长河坝覆盖层料(CHB)不同围压不同应力水平时的回弹模量, 如图4所示。图4中可见, 对同一围压 s_3 , 随应力水平 S 的增大, 回弹模量略有变化, 总体呈现先增大后减小的趋势, 回弹模量似乎在应力水平0.65左右时最大。尽管同一

围压下随应力水平变化, 回弹模量有变化, 但变化幅度不大, 最大约 10%。因此, 后面将利用同一围压不同应力水平的回弹模量平均值进行重点分析。

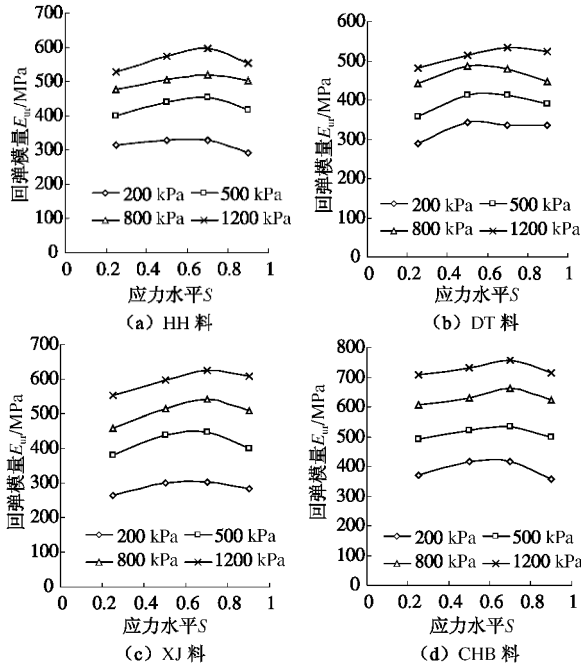


图 4 $E_{ur} - S - s_3$ 关系曲线

Fig. 4 Relationship among E_{ur} , S and s_3

图 4 可见, 对应同一应力水平, 回弹模量随围压增大而显著增大。同一围压下不同应力水平对应的回弹模量平均值列于表 2, 其数值也清楚表明了这一点。

为反映 E_{ur} 随围压变化规律, 将它们在 $\lg(E_{ur}/p_a)$ 与 $\lg(S_3/p_a)$ 坐标中绘出, 如图 5。图中可以看到它们有较好的线性关系, 其中截距为 $\lg(K_{ur})$, 斜率为 n_{ur} 。参数 K_{ur} , n_{ur} 数值列于表 3。这说明在邓肯模型中, 用式 (2) 确定回弹模量是可行的。

用本文单调加载三轴试验结果整理出各试样在不同围压下的初始弹模 E_i , 见表 2。依据邓肯一张模型, 由 $\lg(E_i/p_a)$ 与 $\lg(S_3/p_a)$ 的线性关系 (即式 (3)) 可拟合得到参数 K , n , 数值亦列于表 3。

表 2 还给出了不同围压不同应力水平的平均回弹模量与初始模量比值。可以看出回弹模量 E_{ur} 与初始弹性模量 E_i 的比值大致在 2.5~5.0 范围。

实际应用时, 初始模量参数 K , n 根据三轴试验确定, 回弹模量参数由于试验麻烦一般不测定。因而, 用邓肯模型进行有限元计算时, 常假定 $n_{ur}=n$, 同时假定 K_{ur} 是 K 的若干倍。从表 3 可以看出, 4 种料的参

数 n_{ur} 与 n 大多相差较大。若取定 $n_{ur}=n$, 则 K_{ur} 与 K 的大致关系如何取用值得研究。从而为实际运用邓肯模型时粗粒土回弹模量数 K_{ur} 的取值提供一定的试验参考依据。

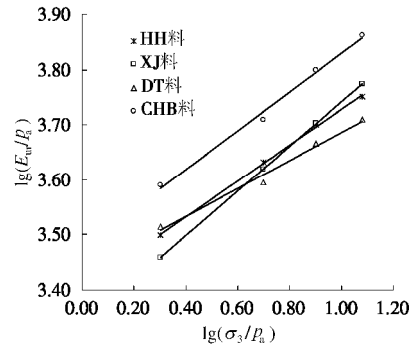


图 5 $\lg(E_{ur}/p_a) - \lg(S_3/p_a)$ 关系曲线

Fig. 5 Relationship between $\lg(E_{ur}/p_a)$ and $\lg(S_3/p_a)$

用表 2 中不同围压对应的 E_{ur} , 并取 $n_{ur}=n$, 由式 (2) 计算出回弹模量 K'_{ur} , 研究比值 $R = K'_{ur}/K$ 的大小。图 6 给出了 4 种料的比值 R 随围压变化关系。可以看出, 若取 $n_{ur}=n$, 参数 K_{ur} 的取值应为参数 K 的 2.5~5.0 倍左右。因此, 对粗粒土, 若参照黏土或砂土的经验取 $K_{ur}=(1.2\sim 3.0)K$ 可能偏小。

需要指出, 本文的卸载一再加载试验都是把轴向附加应力全部卸除后再加载。在实际工程中, 一般不会出现荷载全部卸除的情况, 大幅度卸载的情况也不多见。从图 2 (a) 的卸载 - 再加载段 ($s_1 - s_3$) - e_1 关系曲线可以看出, 卸载初始段的斜率明显大于回滞环交点连线的斜率。因此, 对于卸载不是很大的情况, 即使取 $K_{ur}=(2.5\sim 5.0)K$, 也很可能低估了回弹模量值。当然, 这还需要对卸载及再加载段进行深入研究, 甚至用非线性来考虑这个问题。

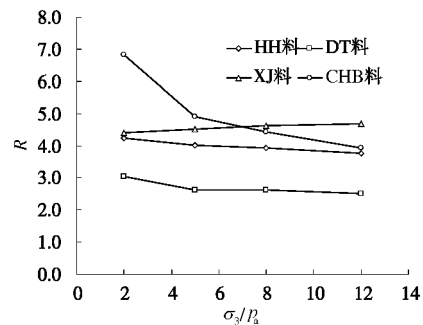


图 6 $R = K'_{ur}/K$ 随围压变化关系

Fig. 6 Relationship between $R = K'_{ur}/K$ and confining pressure

表 2 初始弹性模量 E_i 及不同围压各应力水平时回弹模量 E_{ur}

Table 2 Values of initial Young's modulus E_i and modulus of resilient E_{ur} at various stress states

参数	HH料				DT料				XJ料				CHB料			
	200 /kPa	500 /kPa	800 /kPa	1200 /kPa	200 /kPa	500 /kPa	800 /kPa	1200 /kPa	200 /kPa	500 /kPa	800 /kPa	1200 /kPa	200 /kPa	500 /kPa	800 /kPa	1200 /kPa
E_{ur}/MPa	316	428	501	564	327	394	464	513	288	416	506	596	390	513	631	728
E_i/MPa	77	99	125	156	103	164	182	192	69	87	97	143	59	98	140	193
E_{ur}/E_i	4.1	4.3	4.0	3.6	3.2	2.4	2.6	2.7	4.2	4.8	5.2	4.2	6.6	5.2	4.5	3.8

3 结 论

本文对 2 种粗粒土 4 种级配料进行了试样直径为 101 mm 的常规三轴固结排水剪切试验及加卸载剪切试验, 研究了粗粒土回弹性质及回弹模量取值规律, 得到以下几点结论。

(1) 对所试验的粗粒土, 绝大多数围压下, 和单调加载试样相比, 经过卸载 - 再加载过程后试样抗剪强度有一定提高; 在轴向附加应力卸载过程中, 低应力水平 ($S=0.25$ 或 0.5) 时, 试样体积表现为轻微膨胀或维持不变; 但高应力水平 ($S=0.7$ 或 0.9) 时卸载, 试样多表现为明显的体缩。

(2) 相同围压下, 回弹模量 E_{ur} 随应力水平的增大基本呈先增大后减小趋势, 但变化幅度较小, 约 10%; 相反, 随围压增大, 回弹模量显著增大, 围压与回弹模量符合邓肯模型的指数函数假定。因此, 可以认为, 实际应用时可以假定回弹模量不随应力水平变化。

(3) 粗粒土回弹模量与相同围压下的初始模量的比值大致在 2.5~5.0 范围, 比目前对黏土或砂土所认识的 1.2~3.0 的值明显增大, 使用时应注意。

(4) 对所试验的 4 种级配料, n_{ur} 和 n 相差较大。应用时若假定 $n_{ur}=n$, 则回弹模量数 K_{ur} 可近似取 2.5~5.0 倍的初始模量数 K 。

参考文献:

- [1] HJELMSTAD K D, TACIROGLU E. A coupled hyperelastic constitutive model for resilient response of granular materials[J]. ASCE, 1997: 178 - 189.
- [2] DUNCAN J M, CHANG C Y. Non-linear analysis of stress and strain in soils[J]. Proc. ASCE, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1970, **96**(5): 1629 - 1653.
- [3] MARSAL R J. Large-scale testing of rockfill materials[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, American Society of Civil Engineering, 1967, **93**(2): 27 - 43.
- [4] 张启岳, 司洪洋. 粗颗粒土大型三轴压缩试验的强度与应力 - 应变特性[J]. 水利学报, 1982(9): 22 - 31. (ZHANG Qi-yue, SI Hong-yang. The strength and stress-strain properties of coarse grained soil in large-scale triaxial tests[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1982(9): 22 - 31. (in Chinese))
- [5] 魏 松, 朱俊高. 粗粒土料湿化变形三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2007, **28**(8): 1609 - 1615. (WEI Song, ZHU Jun-gao. Study on wettig behavior of coarse grained soil in triaxial test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(8): 1609 - 1615. (in Chinese))
- [6] 刘萌成, 高玉峰, 刘汉龙. 堆石料剪胀特性大型三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, **29**(2): 205 - 211. (LIU Meng-cheng, GAO Yu-feng, LIU Han-long. Study on shear dilatancy behaviors of rockfills in large-scale triaxial tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **29**(2): 205 - 211. (in Chinese))
- [7] 古兴伟, 沈 蓉, 张永全. 复杂应力路径下糯扎渡堆石料应力 - 应变特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(增刊 1): 3251 - 3260. (GU Xing-wei, SHEN Rong, ZHANG Yong-quan. Study on stress-strain properties of rockfill materials under different stress paths in Nozhadu project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(S1): 3251 - 3260. (in Chinese))
- [8] 刘萌成, 高玉峰, 刘汉龙. 应力路径条件下堆石料剪切特性大型三轴试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(1): 176 - 186. (LIU Meng-cheng, GAO Yu-feng, LIU Han-long. Study on shear behaviors of rockfill in large-scale triaxial tests under different stress paths[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(1): 176 - 186. (in Chinese))
- [9] ZAMAN M, CHEN D, LAGUROS J. Resilient moduli of granular materials[J]. J Transp Eng, 1994, **120**(6): 967 - 988.
- [10] HICKS R G. Factors influencing the resilient properties of granular materials (PhD thesis) [D]. Univ of California at Berkeley, Berkley, Calif. 1970.
- [11] SL237—1999 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999. (SL237—1999 Soil test procedures[S]. Beijing: China Water Power Press, 1999. (in Chinese))
- [12] 矫德全, 陈愈炯. 土的各向异性及卸荷体缩[J]. 岩土工程学报, 1994, **16**(4): 9 - 16. (JIAO De-quan, CHEN Yu-jiong. Study on anisotropy and unloading volume-contraction of soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, **16**(4): 9 - 16. (in Chinese))
- [13] 李广信, 武世锋. 土的卸载体积收缩的试验研究及其机理探讨[J]. 岩土工程学报, 2002, **24**(1): 47 - 50. (LI Guang-xin, WU Shi-feng. Study on experiment and mechanism of unloading volume-contraction of soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, **24**(1): 47 - 50. (in Chinese))
- [14] 殷宗泽. 土工原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007. (YIN Zong-ze. Geotechnical theory[M]. Beijing: China Water Power Press, 2007. (in Chinese))