# 超深厚覆盖层中深埋细粒土动力变形和强 度特性三轴试验研究<sup>®</sup>

杨正权<sup>1,2</sup>,刘启旺<sup>1,2</sup>,刘小生<sup>1,2</sup>,杨玉生<sup>1,2</sup>,陈 宁<sup>1,2</sup>

(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 100048)

摘要:土石坝(超)深厚覆盖层中的深埋细粒土难以完全挖除(换填),其在地震作用下的动力变形特 性和强度特性是科研设计人员关注的问题。本文进行某大型土石坝工程超深厚覆盖层地基中的深 埋粉砂层土动力特性三轴试验,研究其在地震荷载作用下的动力变形与强度特性,并为大坝—地基 系统动力分析和抗震设计提供基础资料。研究表明:试验土料最大动剪模量和平均有效应力在双 对数坐标中呈良好的线性关系,不同围压力条件下的模量衰减(阻尼比增长)曲线可以采用参考剪 应变的方式进行归一,可用试验确定特定围压力条件下的模量衰减(阻尼比增长)曲线外延推求任 意围压力条件下的相应曲线;试验土料在地震荷载作用下的动强度特性主要受土体密度、固结条件 和围压力条件等控制,当土体处在不等向固结状态时,不同动力破坏标准下确定的土体动强度特性 参数差异较大。

关键词:超深厚覆盖层;动三轴试验;动力变形特性;动强度特性;地震总应力抗剪强度
 中图分类号:TU411
 文献标志码:A
 文章编号:1000-0844(2014)04-0824-08
 DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2014.04.0824

# Triaxial Tests on Dynamic Deformation and Strength Characteristics of Fine-grained Soil in Super-deep Overburden Layer

YANG Zheng-quan<sup>1,2</sup>, LIU Qi-wang<sup>1,2</sup>, LIU Xiao-sheng<sup>1,2</sup>, YANG Yu-sheng<sup>1,2</sup>, CHEN Ning<sup>1,2</sup>

(1.State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, Beijing 100038, China;
 2.China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China)

Abstract: The dynamic deformation and strength characteristics of fine-grained soil in the superdeep overburden layer is the focus of engineers because soil buried deeply underground cannot be bulldozed easily. In this study, a series of dynamic triaxial tests is performed in silty sands buried deeply in the super-deep overburden layer foundation of an earth-rock fill dam, and the dynamic deformation and strength characteristics of soil in an earthquake zone are analyzed. The results show a strong linear relationship between the maximum dynamic shear modulus of testing soils and the mean effective stress of soils in the dual-logarithm coordinates system. The decay (increasing) curves of soil dynamic shear modulus (damping ratio) in various confined pressure conditions can be unified by the model of soil reference shear strain, and the decay (increasing) curves of soil in an arbitrary stress condition. The dynamic strength characteristics of testing soils is influenced by the density of soil and the testing stress condition; significant differences in the characteristic parameters of soil dynamic strength testing with various failure criteria are shown

① 收稿日期:2014-08-20

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划,No.2013CB036404);中国水利水电科学研究院科研专项(岩集 1467) 作者简介:杨正权(1980-),男,吉林集安人,博士,工程师,主要从事土动力学及土工结构抗震研究.E-mail:yangzhq@iwhr.com

when the soil is the condition of unequal stress consolidation.

Key words: super-deep overburden layer; dynamic triaxial test; dynamic deformation characteristics; dynamic strength characteristics; dynamic total stress shear strength

# 0 引言

强震和复杂深厚覆盖层问题是我国西部水电工 程建设所面临的巨大挑战,也是很多工程能否成功 建设的控制性因素<sup>[1]</sup>。深厚覆盖层中的细粒土软夹 层在地震作用下动强度特性较差,存在液化可能;其 土性较软弱,抗地震动变形能力较差,在强震作用下 会产生较大的地震动位移。强震作用下,不管是覆 盖层地基的液化失效,还是较大的地震动位移,都会 对其上土石坝坝体的稳定性和正常运行带来重大影 响。因此,在深厚覆盖层上土石坝动力分析与安全 评价和抗震设计中具有重要影响。

我国西部某大型土石坝工程的主体坐落于河谷 超深厚覆盖层上,钻孔揭露覆盖层最大深度超过 500 m,在国内外大型水电工程建设中尚属首例。 且坝址区位于高地震烈度区,区域地震危险性分析 结果表明坝址区 100 年超越概率 2%基岩水平向加 速度峰值超过 0.5 g。结合坝址区众多钻孔资料可 知,整个河谷覆盖层地基由 6 个主要土层构成,自下 而上分别是:①层,冰碛及冰水堆积块碎石土层;② 层,冲洪积、堆积含碎(卵)砂层;③-1 层,河湖相沉 积含砾砂层(夹粉质砂);③-2 层,河湖相沉积粉质 黏土层;③-3 层,河湖相沉积含砾砂层(夹粉质 砂);④层,现代河床冲积砂卵砾石层。

覆盖层中的细粒土层对整个大坝-地基系统在 地震作用下的稳定性具有重大影响,尤其是③-1 层中的粉质砂层,不仅埋深大(80 m 左右),而且土 层很厚(150~170 m),难以换填,抗震加固成本较 高。现场试验和室内物性试验研究成果均表明,该 土层具有天然密度小、承载力低和低压缩性等特点, 且存在地震液化的可能。因此,覆盖层地基中③-1 层粉质砂土的动力特性成为了整个大坝工程科研和 设计工作关注的重点问题,包括土的动力变形特性 和动强度特性等。

本文针对超深厚覆盖层地基中的深埋细粒土 (③-1粉质砂土),进行土的动力特性三轴试验研 究,研究土的相关动力特性,并为大坝-地基系统动 力分析和抗震设计提供计算参数。主要的工作包 括:研究土的基本物理性质,并结合现场勘探资料和 静力计算成果,综合确定土的动力特性试验控制条 件;利用共振式振动三轴仪进行土的固结、不排水振 动扭剪试验,研究试验土料的动力变形特性;利用中型振动三轴仪进行土的固结、不排水振动试验,研究试验土料的动强度特性。本文的研究成果对工程技术人员认识该类土基本动力特性具有重要意义,可为本工程动力分析与安全评价和抗震设计提供基础资料,也可为类似工程提供定性参考。

#### 1 土料基本物理性质及试验条件

#### 1.1 试验设备

试验土料属细粒土,试验选择在中、小型三轴仪 上进行,所有试样尺寸均为 $\phi$ 50 mm×100 mm。土 的动力变形特性试验在日本产 DTC-158 型共振式 三轴仪上进行,该仪器为底端固定、上端附有质量块 的弹簧阻尼振动系统,测试的有效动剪应变范围为  $10^{-6} \sim 10^{-3}$ 。土的动强度特性试验在日本产 S-3-D 型中型液压振动三轴仪上进行,该设备可提供的最 大周围压力为 2.5 MPa,最大轴向荷载为 20 kN。

#### 1.2 土料基本物理性质及其试验条件的确定

由现场勘探资料,结合室内基本物理性质试验 成果,试验土料定性为粉质砂土。为验证试验土料 对整个土层颗粒组成特性的代表性,对现场来料进 行了颗粒分析试验,并与现场钻孔取得的级配曲线 进行对比,如图1所示。从图1可以看出,试验土料 级配曲线与土层各钻孔平均级配曲线很接近,试验 土料的级配特性对实际土层的总体颗粒组成特性具 有代表性。

试验控制干密度根据试验土料的室内相对密度 试验成果,并结合现场勘查资料联合确定:相对密度 试验结果表明试验土料的最大干密度和最小干密度 分别为 1.92 g/cm<sup>3</sup> 和 1.35 g/cm<sup>3</sup>,而现场资料的统 计结果表明各钻孔土的平均相对密度为 78%,因此 综合确定试验装料控制干密度为 1.78 g/cm<sup>3[2]</sup>。此 外,为了考察土体密度对其动强度特性的影响,还进 行了干密度为 1.83 g/cm<sup>3</sup>(相对密度 85%)的动强 度特性试验。

根据大坝-地基系统静力分析得到的土层应力 分布状态,结合试验设备的具体性能和大坝-地基系 统动力分析的要求,综合确定土体动力特性试验的 应力条件:在动强度特性振动三轴试验中,有效围压 力范围为 300~2 500 kPa,固结比为 1.0 和 2.0;在 动力变形特性共振柱试验中,由于受试验设备性能限制,有效围压力范围为 200~600 kPa,固结比为 1.0 和 2.0。所有试验均在固结不排水条件下进行。



图 1 试验土料级配曲线和现场典型钻孔取料 级配曲线的对比

Fig.1 Contrast of the gradation curves of testing soil and field soil

# 2 土料动力变形特性试验

土的动力变形特性研究,首先是要确定不同应 力条件下(固结比和平均有效应力)土的最大动剪模 量 G<sub>max</sub>,然后确定动剪模量比(G/G<sub>max</sub>)随动剪应变 增加而衰减的关系曲线和阻尼比随动剪应变增加而 增长的关系曲线。

#### 2.1 基本试验结果及影响因素分析

不同固结比时,最大动剪模量  $G_{\text{max}}$ 同平均有效 应力  $\sigma_0^i$  间的关系可以通过式(1)表达<sup>[3]</sup>,

$$G_{\max} = CP_{a} \left(\frac{\sigma_{0}}{P_{a}}\right)^{n}$$
(1)

式中, $P_a$ 为大气压力;C和n分别为土的动剪模量 系数和动剪模量指数;平均有效应力 $\sigma'_0 = (\sigma'_1 + \sigma'_3)/2,\sigma'_3$ 和 $\sigma'_1$ 分别为有效围压和有效固结轴向应力。

在固结比一定时,采用分级加载的方法测试试 样在不同围压力(平均有效应力)条件下的最大动剪 模量,然后在双对数坐标中进行拟合( $G_{max}/P_a$ 和  $\sigma_0/P_a$ 呈直线关系)得到土体在相应固结比时的动 剪模量系数和动剪模量指数。不同固结比时, $G_{max}/P_a$ 和  $\sigma_0/P_a$ 在双对数坐标中的关系和参数拟合, 如图 2 所示。

从图 2 可以看出, G<sub>max</sub>/P<sub>a</sub>和 σ<sub>0</sub>/P<sub>a</sub>在双对数 坐标中呈良好的直线关系, 这表明式(1)的模式可以 较好地表达土体最大动剪模量与其所处平均有效应 力状态间的关系。拟合得到固结比为 1 时, 土的动 剪模量系数和动剪模量指数分别为 712 和 0.54; 固



- 图 2 最大动剪模量同平均有效应力间关系曲线 及其特性参数拟合
- Fig. 2 Relationship curves of maximum dynamic shear modulus and mean effective stress of soil and their parameter fitting

结比为2时,土的动剪模量系数和动剪模量指数分 别为748和0.54。由此可知,固结比对试验土料的 动力变形特性影响很小,固结比增大时土体动剪模 量系数略有提升。

由动剪模量比和阻尼比同动剪应变间的关系曲 线可知(参考后图 4):随着动剪应变的增长,土体的 动剪模量逐渐减小,而阻尼比却在增加;随着土体所 处平均有效应力的增加,模量(阻尼比)的衰减(增 长)幅度逐渐变小;固结比较大时,模量(阻尼比)随 动剪应变增加衰减(增长)的速度比固结比较小时要 慢。

# 2.2 试验结果的归一化处理和应力条件外延

受试验设备自身性能限制,共振柱试验中的最 大有效围压力只有 600 kPa,而土体在实际地层中 所受围压力最大值接近 3 MPa,两者有较大差距。 基于对大量细粒土动力变形特性试验资料结果的整 理研究,Hardin和 Drnevich 认为细粒土(细砂和粉 土)在不同围压力条件下的模量衰减(阻尼比增长) 曲线可采用参考剪应变的方式进行归一<sup>[4]</sup>,可以通 过特定围压力条件下的试验归一模量衰减(阻尼比 增长)曲线外延推求任意围压力条件下的相应曲线。 本文尝试通过参考剪应变的方式,对试验土料在不 同围压力条件下的模量衰减(阻尼比增长)试验结果 进行归一化处理,确定试验土料在不同围压力条件 下的归一性。

不同围压力条件下,土体单元的参考剪应变 γ<sub>r</sub> 通过式(2)确定,

$$\gamma_r = \frac{\tau_{\max}}{G_{\max}} \tag{2}$$

式中,G<sub>max</sub>为土的最大动剪模量,通过式(1)确定;<sub>7max</sub>为土体单元所受最大剪应力,由式(3)式计算得到,

$$\tau_{\max} = \left\{ \left[ \left( \frac{\sigma_1' + \sigma_3'}{2} \right) \sin \phi' + c \cos \phi' \right)^2 - \left( \frac{\sigma_1' - \sigma_3'}{2} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$
(3)

式中,c和¢′分别为土体的静黏滞强度和有效内摩 擦角;其他参数意义同前。 图 3 为不同固结比时基于参考剪应变的不同围 压力条件下,模量衰减曲线和阻尼比增长曲线的归 一化结果。从图中可以看出,不同围压力下试验土 料的参考剪应变归一模量衰减曲线和阻尼比增长曲 线基本重合。这表明,不同围压力条件下试验土料 的参考剪应变一模量衰减曲线和阻尼比增长曲线可 以进行归一,可以通过特定试验压力条件下的参考 剪应变归一模量衰减曲线和阻尼比增长曲线,外延 推求任意围压力条件下的土体动剪模量和阻尼比同 土体动剪应变间的衰减(增长)关系。图 4 是通过参 考剪应变归一化方法外延推求得到围压 1 500 kPa 和 2 500 kPa 时的土体动剪模量衰减曲线和阻尼比 增长曲线,及其与试验直接确定得到围压 200 kPa 和 600 kPa 时的模量衰减曲线和阻尼比增长曲线的 对比。



图 3 不同围压力条件下,基于参考剪应变的模量衰减曲线和阻尼比增长曲线归一化处理 Fig.3 Normalization processing of decay (increasing) based on reference shear strain curves of soil dynamic shear modulus (damping ratio) based on reference shear strain in different confining pressure conditions



图 4 试验和归一化方法相结合确定土体动剪模量衰减曲线和阻尼比增长曲线

Fig.4 Decay (increasing) curves of soil dynamic shear modulus (damping ratio) by the combination of test and normalization method

# 3 土料动强度特性试验

#### 3.1 土的动力破坏控制标准

对覆盖层地基中的可能液化土层,要采取一定

的工程抗震措施来提高土体的抗地震液化能力。对 土体自身而言,通过一定措施提升相对密度是提高 其地震动强度的根本性手段之一。本次试验为了考 察试验土料在采用一定抗震措施提高其相对密度后 强度的变化情况,在天然相对密度(78%,干密度 1.78g/cm<sup>3</sup>)强度试验的基础上,进行了加固后相对 密度(85%,干密度1.83g/cm<sup>3</sup>)下土料的动强度试 验。

目前,土的动强度特性试验中多以初始液化(动 孔压比达到 1)或轴向应变  $\epsilon_a$  达到 5%作为土体动 力破坏的标准。已有研究表明,土体在等压固结状 态下,这两种破坏标准确定的土体动力破坏等效振 次基本相同<sup>[5]</sup>。本次试验以轴向应变值  $\epsilon_a$  达到 5%作为土体动力破坏的基本控制标准。此外,为了 考察不同轴向应变控制标准对土体动强度特性试验 结果的影响规律,在控制相对密度 85%的试验中, 同时以轴向应变达到 5%和 10%作为破坏标准分别 整理试验结果。

#### 3.2 土的地震总应力抗剪强度

土的动强度是指土样在一定振次  $N_f$ 规则循环 荷载(对应特定震级)作用下,使试样达到某种破坏 标准所需要的动剪应力水平,一般用动剪应力比表 示。动剪应力比定义为 $\Delta \tau / \sigma_0$ ,其中, $\Delta \tau$  为试样 45° 剪切面上的动剪应力, $\Delta \tau = \sigma_d / 2(\sigma_d$  为单幅轴向动 应力); $\sigma_0$  为试样 45°剪切面上的初始有效法向应 力,在三轴应力状态下和前述平均有效应力等价。 动强度特性试验的初步结果可以用动剪应力比  $\Delta \tau / \sigma_0$  与相应等效破坏振次  $N_f$ 间的关系曲线来表示, 进而根据汪闻韶院士提出的地震总应力抗剪强度的 概念,整理出不同破坏振次  $N_f$ (地震震级)对应的土 体地震总应力抗剪强度指标<sup>[6]</sup>。

通过试验直接得到的不同围压条件下土体动剪 应力比 $\Delta \tau / \sigma_0$ 和破坏振次 $N_f$ 间关系曲线,可以确 定特定振次(地震震级)时,使得土体发生动力破坏 的临界动剪应力比及相应地震总应力抗剪强度 $\tau_{fs}$ 和潜在破坏面上的初始有效法向应力 $\sigma'_{f0}$ 。土体地 震总应力抗剪强度 $\tau_{fs}$ 和初始有效法向应力 $\sigma'_{f0}$ 按 (4)式确定:

$$\tau_{fs} = (\Delta \tau_f)_n \mp \tau_{f0} \tag{4-1}$$

$$(\Delta \tau_f)_n = (\Delta \tau / \sigma_0')_n \cdot \sigma_0' \cdot \cos \phi' \qquad (4-2)$$

$$\tau_{f^0} = \tau_0 \cos \phi' \qquad (4-3)$$

$$\sigma'_{f^0} = \sigma'_0 \pm \tau_0 \sin\phi' \qquad (4-4)$$

以上各式中, $(\Delta \tau_f)_n$ 和  $\tau_{f0}$ 分别为潜在破坏面上的 动剪应力和初始剪应力; $\tau_0$ 为试样 45°剪切面上的 初始剪应力; $\phi$ 为土的静力有效内摩擦角, $\sigma'_0$ 和  $\Delta \tau$ 的意义同前。式(4-1)和式(4-4)中的正负号取决于 动剪应力和初始剪应力的大小关系,即  $\Delta \tau > \tau_0/$   $sin\phi$ 时,式(4-1)取正号,式(4-4)取负号; $\Delta \tau \leq \tau_0/$ sin $\phi$  时,式(4-1)取负号,式(4-4)取正号。

地震总应力抗剪强度  $\tau_{fs}$ 和潜在破坏面上初始 有效法向应力 $\sigma_{f0}$ 间的关系,可用以下和静力强度相 似的关系式表达:

$$\tau_{fs} = (\tau_{fs0})_a + \mathrm{tg}\phi_{da} \cdot \sigma'_{f0} \tag{5}$$

式中,( $\tau_{fs0}$ )<sub>a</sub>和 tg $\phi_{da}$ 分别为初始剪应力比( $\tau_{f0}$ /  $\sigma_{f0}$ )为 a 时的地震总应力抗剪强度指标——动凝聚 力和动内摩擦系数,表征土体在一定应力条件下动 强度水平,它们与 a 间均近似为直线关系:

$$(\tau_{fs0})_a = \tau_{fs0} + \zeta \cdot \alpha \tag{6}$$

$$tg\phi_{da} = tg\phi_{d0} + \beta \cdot \alpha \tag{7}$$

式中, $\tau_{fs0}$ 和 tg $\phi_{d0}$ 分别为 $\alpha = 0$ 时(等压状态)的地震 总应力抗剪强度指标;  $\zeta 与 \beta$ 为比例系数。 $\tau_{fs0}$ 、 tg $\phi_{d0}$ 、 $\zeta 和 \beta$ 一起作为为地震总应力抗剪强度参数, 可以通过它们确定任意应力条件下土体的地震总应 力抗剪强度。

除地震总应力抗剪强度外,还研究了地震时土 中动孔隙水压力随振动发展的增长模式,整理得到 动孔孔压比同振次间的增长关系曲线,可作为坝 体一地基有效应力分析的基础资料。

### 3.3 基本试验结果及影响因素分析

图 5 给出了不同固结比时,不同围压力条件下 相对密度 78%试验土料的动力破坏等效振次和动 剪应力比间关系曲线的对比(轴向应变 5%破坏标 准)。图 6 给出了不同固结比时,不同围压力条件下 相对密度 85%试验土料在两种破坏标准时(轴向应 变 5%和轴向应变 10%),动力破坏等效振次和动剪 应力比间关系曲线的对比。图 7 给出了两种控制密 度试验土料,在不同动力破坏标准时地震总应力抗 剪强度曲线的对比,表 1 为相应强度参数值的汇总。 地震总应力抗剪强度参数分别取等效振次 12、20、 30 和 40 整理结果,对应地震震级分别为 7、7.5、8 和 8.5 级。图 8 给出了试验土料在不同相对密度时,不 同围压条件下,振动过程中土中动孔隙水压力增长 曲线的对比。

从图 5 和图 6 可以看出:随着等效振次的增加, 土体抗地震破坏动剪应力比逐渐变小;随着围压的 增加,土体抗地震破坏动剪应力也相应增加,但动剪 应力比却在减小,围压对一定振次时破坏动剪应力 比的影响在固结比较大时表现的更明显;固结比越 大,同等水平动剪应力作用下土体动力破坏需要的 振次越多,土的抗地震破坏能力越强;随着土料试验 控制干密度的增加,土料的抗地震破坏能力也相应 有较大提高。

由图 6 还可知,采用不同的轴向应变值作为土体的动力破坏控制标准时,对于等压固结土(固结比 K<sub>c</sub>=1):一定动应力条件下土体动力破坏等效地震 周次基本相当,这表明等压固结土在达到 5%轴向 应变后很快即发展到轴向应变 10%。究其原因在 于等压状态下土体的动力破坏是液化破坏,土体液 化后轴向变形迅速发展,两种轴向应变标准对应的 等效地震周次自然很接近。对于偏压固结土(固结 比K。大于1):10%轴向应变破坏标准下,一定动应 力条件下土体动力破坏等效地震周次较5%时有较 大提升,这表明偏压状态下土体即使在达到5%的 轴向应变后仍具有一定的抗地震变形破坏能力。



图 5 相对密度 78% 试验土料振动破坏周次和动剪应力比关系曲线

Fig.5 Relationship curves of dynamic failure cycles and cyclic shear stress ratios of whose which relative density is 78%



图 6 不同破坏标准下,相对密度 85%试验土料振动破坏周次和动剪应力比间关系曲线的对比 Fig.6 Comparison of relationship curves of dynamic failure cycles and cyclic shear stress ratio of soil whose relative density is 85% with different failure criteria

由图 7,并结合表 1 可知:与以上动剪应力比和 等效破坏振次间的关系相对应,相同地震震级时(对 应于试验中相同等效破坏振次),试验确定土体地震 总应力抗剪强度参数随着试验控制密度的提升而增

而在偏压固结时土体的动强度指标随着控制标准的 降低而有较大提升(ζ 和 β)。



图 7 不同试验控制密度和破坏控制标准时,试验土料地震总应力抗剪强度曲线对比

Fig.7 Contrast of soil dynamic total stress shear strength curves in different testing densities and failure criteria

破坏标准	干密度/(g•cm <sup>-3</sup>	)等效振次/N <sub>f</sub>	$ au_{f0}/\mathrm{kPa}$	$ au_{fs0}/\mathrm{kPa}$	$tg\phi_{d0}$	$\zeta/\mathrm{kPa}$	β
轴向应变 5%	1.78	12	$0\!\sim\!1$ 675	10.40	0.18	244.03	0.89
			$1 \ 300 \sim 2 \ 449$	28.82	0.16	128.24	0.96
			$1 900 \sim 3 222$	39.58	0.16	346.39	0.89
		20	0~1 675	14.56	0.15	168.09	0.94
			$1 \ 300 \sim 2 \ 449$	16.47	0.15	194.90	0.93
			$1 900 \sim 3 222$	47.50	0.13	293.83	0.90
		30	0~1675	16.64	0.14	129.35	0.97
			$1 \ 300 \sim 2 \ 449$	12.35	0.14	206.99	0.92
			$1 900 \sim 3 222$	39.58	0.13	254.42	0.91
轴向应变 5%	1.85	12	0~1 000	24.96	0.20	163.86	1.02
			$1\ 000\!\sim\!3\ 125$	49.41	0.17	374.09	0.83
		20	0~1 000	18.24	0.19	170.57	1.00
			$1\ 000\!\sim\!3\ 125$	49.41	0.15	347.89	0.84
		30	0~1 000	12.96	0.19	167.86	0.99
			$1\ 000\!\sim\!3\ 125$	51.77	0.14	349.86	0.83
		40	0~1 000	12.00	0.18	154.57	1.00
			$1 \ 000 - 3 \ 125$	47.06	0.14	345.86	0.82
轴向应变 10%	6 1.85 ·	12	$0\!\sim\!1\ 000$	24.48	0.21	215.11	1.23
			$1\ 000\!\sim\!3\ 125$	52.94	0.18	364.00	1.10
		20	0~1 000	19.20	0.20	217.71	1.19
			$1\ 000\!\sim\!3\ 125$	44.71	0.16	391.89	1.03
		30	1 000	14.88	0.19	215.80	1.15
			$1\ 000\!\sim\!3\ 125$	45.88	0.15	371.06	1.01
		40	0~1 000	12.00	0.19	215.14	1.12
			$1\ 000\!\sim\!3\ 125$	43.53	0.15	386.51	0.97

#### 表1 地震总应力抗剪强度参数汇总

Table 1	Dynamic total	stress shear	strength	parameters	of soil
	,				

由图 8 可知,当饱和土体在等压状态下固结时, 土体的动力破坏表现为振动液化和大幅的轴向变 形。随着振动周次的增加,动孔隙水压力持续增加, 最终和有效周围压力相等,土体发生振动液化,初始 液化后变形也随之迅速发展;当饱和土体在偏压状 态下固结时,土中孔隙水压力随着振动的发展而逐 渐增加,但是不会发生液化。试验控制密度较大时, 土中孔隙水压力的增长较密度较低时缓慢得多,最 终破坏时土中的动孔压比值也较小。

# 5 结论

本文进行某大型土石坝工程超深厚覆盖层地基 中深埋粉砂层土的动力特性三轴试验,包括土的动 力变形特性试验和动强度特性试验,研究其在地震 荷载作用下的动力变形和强度特性,为大坝一地基 系统动力分析研究和抗震设计提供基础资料。主要的研究结论为:

(1) 试验土料级配曲线与相应土层各钻孔平均

级配曲线很接近,试验土料的颗粒级配对实际土层 的颗粒组成特性具有代表性;



图 8 不同应力条件下,土中动孔隙水压力随振动发展的增长关系曲线对比

Fig.8 Increasing relationship curves of dynamic pore water pressure and vibration cycles under different stress conditions

(2)试验土料最大动剪模量和平均有效应 力在双对数坐标中呈良好的线性关系,不同围压 力下的动剪模量衰减(阻尼比增长)曲线可以采 用参考剪应变的方式进行归一,可以用试验确定 特定围压下的模量衰减(阻尼比增长)曲线外延 推求任意围压力条件下的相应曲线;

(3)试验土料在地震荷载作用下的抗地震破坏能力主要受围压力、固结比和相对密度等条件控制,通过一定的工程措施提高地基中细粒土的相对密度可以有效提升土体的抗地震破坏能力;

(4)当土体处在不等向固结状态时,不同轴向应变动力破坏标准下确定的土体动强度特性参数差异较大。

参考文献(References)

[1] 杨正权.土石坝动力分析方法振动台模型试验验证及地震动输入研究[D].北京:中国水利水电科学研究院,2011.
 YANG Zheng-quan.Study on Dynamic Analysis Methods
 Verification Using Shaking Table Model Test and Seismic
 Motion Input of Earth-rock Fill Dam[D].Beijing: China
 Institute of Water Resources and Hydropower Research

(IWHR),2011.(in Chinese)

- [2] 中华人民共和国水利部.SL237-1999 土工试验规程[S].北 京:中国水利水电出版社,1999.
   Ministry of Water Resources of PRC.Code of Soil Test (SL237-1999)[S].Beijing:China Water Resource and Hydro-powder Publishing House,1999.(in Chinese)
- [3] 钱家欢,殷宗泽.土工原理与计算[M].北京:中国水利水电 出版社,1996.

QIAN Jia-hua, YIN Zong-ze. Geotechnical Theory and Calculation[M]. Beijing: China Water Resource and Hydropowder Publishing House, 1996. (in Chinese)

- [4] Hardin, Drnevich. Shear Modulus and Damping in Soils[J].Journal of the Soil Mechanics and Foundation, Asce, 1972,98, (SM,7).
- [5] 刘小生,汪闻韶,赵冬.饱和原状砂土的静、动力强度特性试验研究[J].水利学报,1991,22 (11):41-46.
  LIU Xiao-sheng, WANG Wen-shao, ZHAO Dong. Experimental Study on Static and Dynamic Strength Characteristics of Undisturbed Sand[J]. Journal of Hydraulic Engineering,1991, 22 (11):41-46.(in Chinese)
- [6] 汪闻韶. 土的动力强度和液化特性[M].北京:中国水利水 电出版社,1997.WANG Wen-shao. Dynamic Strength and Liquefaction

Characteristics of Soil[M].Beijing: China Water Resource and Hydro-powder Publishing House, 1997. (in Chinese)