

文章编号: 1000-7598-(2008) 03-0696-05

# 淤泥质软土动态流变特性与流变参数研究

胡 华, 顾恒星, 俞登荣

(厦门大学 土木工程系, 厦门 361005)

**摘 要:** 实际调查和理论分析表明, 软弱岩土具有流变特性, 动态载荷作用加速了软弱岩土的流变行为, 成为诱发岩土地质灾害的重要因素和主要动力。在测试分析动载作用下淤泥质软土的流变力学特性基础上, 建立了动态黏弹塑性流变力学模型和流变方程, 推导出动态流变参数计算式; 通过测试, 分析了动态剪切作用频率、动态剪切应变、淤泥质软土含水率等因素对动态流变参数影响特性。研究结果对揭示动载作用下淤泥质软土动态流变特性与流变参数影响变化规律, 探索软弱岩土突发地质灾害的流变动力学机制等具有一定的理论和现实意义。

**关 键 词:** 动态载荷; 淤泥质软土; 动态流变力学特性; 动态流变参数; 岩土地质灾害

**中图分类号:** TU 447

**文献标识码:** A

## Research on dynamic rheological characteristics and rheologic parameters of sludge soft soil

HU Hua, GU Heng-xing, YU Deng-rong

(Department of Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** The practical investigation and theoretical analysis indicate that the soft rock-soil has rheological characteristics; the dynamic loading can accelerate rheological action of soft rock-soil, and become the important factor and primary power which induce geotechnical engineering disaster and geological disaster. The dynamic rheological characteristic of sludge soft soil are tested; the dynamic viscoelasto-plastic rheological model and rheological equation are established; and the expression of dynamic rheologic parameters are deduced. The dynamic rheological parameters of sludge soft soil are tested under dynamic shear action; the influential characteristic is analyzed that the factors such as dynamic shear frequency, shear strain, water content of sludge soft soil, etc. effect dynamic rheological parameters of sludge soft soil. The research results have actual significance for us to open out the influence disciplinarian of rheological mechanism characteristics and rheological parameters of sludge soft soil under dynamic loading. It has also important academic significance for us to find out rheological dynamics of soft rock-soil bursting out geotechnical engineering disaster and geologic disaster.

**Key words:** dynamic loading; sludge soft soil; dynamic rheological characteristics; dynamic rheological parameters; geotechnical engineering and geological disaster

## 1 引 言

我国幅员辽阔, 江、河、湖等水系发育, 海岸线漫长。境内山川、丘陵、盆地遍布, 地形地貌多样, 且岩土地质条件复杂多变, 软弱岩土覆盖面极其广泛。地形地貌、岩土性质、气候条件、地质环境等因素客观上构成了山体滑坡、崩塌、地面沉陷等地质灾害发生的前提条件<sup>[1, 2]</sup>。我国工业与民用建筑、道路桥梁、岩土与地下工程、水利水电工程、

海防与堤防等工程大部分建立在软弱岩土地基上。实际调查和理论分析表明, 软弱岩土具有流变特性, 在静载作用下流变行为缓慢, 短期内不足以产生严重的变形, 但如果在外部动态载荷如车辆通行、风浪、人类活动造成的各种振动等强烈作用下, 软弱岩土会加速流变, 引发岩土滑动失稳、地基沉降倾斜、建筑工程开裂倒塌、堤岸崩塌等岩土工程灾害<sup>[3]</sup>。动态载荷作用成为加速软弱岩土流变, 并导致岩土地质灾害的外部动力和诱发因素。因此, 结

收稿日期: 2007-06-12

基金项目: 国家自然科学基金资助 (No. 50678155); 福建省高等学校新世纪优秀人才支持计划项目。

作者简介: 胡华, 男, 1968 年生, 博士, 副教授, 从事岩土工程、地质环境与地质灾害防治、地下工程等方向的教学与科研工作。E-mail: xmhuhua@xujc.com

合自然界中经常产生的动态作用力开展软弱岩土动态流变特性、流变参数及其影响因素、地质灾害的流变动力学机制等方面的基础研究, 具有更大的理论和实际意义<sup>[4]</sup>。

## 2 动态流变模型与流变方程

### 2.1 动态黏弹塑性流变特性

软弱岩土具有一定的黏度和初始剪切力, 当剪切外力小于初始剪切力时, 不发生流动变形; 大于该值时, 开始发生不可恢复的塑性流动, 但由于黏性作用, 塑性流动的速度只能逐渐加大, 在塑性流动中又表现出黏性, 故在稳态载荷作用下表现为黏塑性体。但在特定环境和条件下, 如地震、快速振动、动态冲击和动态剪切等过程中, 弹性效应会发挥重要的作用, 表现出部分弹性恢复效应。但由于黏性作用, 其弹性变形不是立即发生, 在外力卸除后, 变形也不是立即恢复, 而是逐步恢复, 弹性中表现出黏性, 故为黏弹性体。黏性既存在于屈服前的弹性中, 也存在于屈服后的塑性变形中。测试表明, 淤泥质软土在动态载荷作用下具有黏弹性特性, 可以作为黏弹塑性体处理<sup>[5]</sup>。

### 2.2 动态黏弹塑性流变模型与流变方程

测试结果表明, 淤泥质软土在动态载荷作用下, 屈服前不发生流动变形, 表现为黏弹性固体特性, 因此, 首先在模型中考虑采用弹性元件与黏性元件并联后形成的黏弹性固体模型。屈服后表现为黏弹塑性体, 开始发生塑性变形流动, 表现为黏弹塑性特性。故在原模型的基础上, 将一个滑块和黏壶并联后再与前面的固体模型串联, 这样就可以建立起如图1所示的反映淤泥质软土在动态载荷作用下的黏弹塑性流变力学模型<sup>[6]</sup>。图中 $\tau_b$ 为初始屈服剪切应力;  $\eta_1$ 为淤泥质软土在动态外力作用下的弹性黏度;  $\eta_2$ 为淤泥质软土在稳定剪切力作用下的塑性黏度;  $E$ 为淤泥质软土弹性模量。

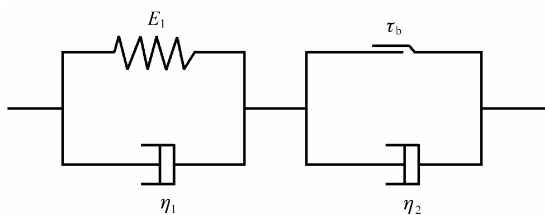


图1 动态载荷作用下淤泥质软土的黏弹塑性流变力学模型

Fig.1 Viscoelasto-plastic rheological model of soft soil under dynamic loading

设整个系统的位移 $\gamma$ , 动态剪应力为 $\tau$ , 黏弹性体和黏塑性体的位移分别为 $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$ , 剪应力分别为 $\tau_1$ ,  $\tau_2$ , 则有:  $\tau = \tau_1 + \tau_2$ ;  $\gamma = \gamma_1 + \gamma_2$ ;  $\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_1 + \dot{\gamma}_2$ ;  $\ddot{\gamma} = \ddot{\gamma}_1 + \ddot{\gamma}_2$ ; 当 $\tau > \tau_b$ 时, 黏塑性体参与流变,  $\tau - \tau_b$ 使黏塑性体发生塑性流动, 表现为黏弹塑性体。假定流变指数 $n$ 为1时, 通过变形和解方程, 消除 $\gamma_1$ 和 $\gamma_2$ , 得到动态剪切载荷作用下淤泥质软土的黏弹塑性流变方程为

$$\eta_1 \eta_2 \ddot{\gamma} = (\eta_1 + \eta_2) \dot{\tau} - E \eta_2 \dot{\gamma} + E(\tau - \tau_b) \quad (1)$$

## 3 动态流变参数及计算式

### 3.1 动态黏弹性流变参数

当动态荷载为呈正弦变化的剪应力时, 动态荷载使淤泥质软土变形, 所做功的一部分以热的形式耗散掉; 另一部分以弹性变形能储存。动态黏弹性特征参数有: 储能模量 $G'$ 、损耗模量 $G''$ 、剪切复数模量 $G$ 、损耗正切 $\tan \delta$ 、复合黏度 $\eta^*$ 等<sup>[7]</sup>。储能模量 $G'$ 与以弹性能形式储存起来, 并在周期性形变中释放出来的那部分能量有关; 损耗模量 $G''$ 与形变时以热的形式耗散掉的那部分能量有关; 剪切复数模量 $G = G' + iG''$ , 式中:  $G'$ 为复数模量的实部;  $G''$ 为复数模量的虚部, 且 $|G|^2 = G'^2 + G''^2$ ; 损耗正切也称力学阻尼或内摩擦, 且 $\tan \delta = G''/G'$ , 是每周形变中耗散能量与最大储存弹性能之比, 同时反映了应力与应变的相位关系; 复合黏度 $\eta^* = \eta_1 + \eta_2 i$ , 且 $|\eta^*|^2 = \eta_1^2 + \eta_2^2$ 。因此, 对于纯弹性体, 在应力的一个周期内, 外力作用的能量先以位能的形式全部储存起来, 然后全部释放出来转变成动能, 使材料回到起始状态, 应力与应变之间无相位差; 对于纯黏性体, 外力作用的能量全部耗散而无能量储存, 应力与应变之间有 $90^\circ$ 的相位差; 对于黏弹性体, 外力作用的能量则部分转变为变形能, 部分耗散为热能, 且应力与应变之间存在相位差。

### 3.2 动态黏弹性流变参数计算式

#### 3.2.1 储能模量和损耗模量与相位差

假定动态荷载为呈正弦变化的剪切力, 动态作用力函数式为

$$\tau = \tau_0 \sin(\omega t + \delta) \quad (2)$$

复数形式为

$$\tau = \tau_0 e^{i(\omega t + \delta)} \quad (3)$$

$$\dot{\tau} = i\omega\tau_0 e^{i(\omega t + \delta)} \quad (4)$$

式中:  $\omega$  为角频率;  $\delta$  为相位角。

则应变  $\gamma$  以正弦形式随时间变化:

$$\gamma = \gamma_0 \sin(\omega t) \quad (5)$$

复数形式为

$$\gamma = \gamma_0 e^{i\omega t} \quad (6)$$

$$\dot{\gamma} = i\gamma_0 \omega e^{i\omega t} = i\omega\gamma \quad (7)$$

$$\ddot{\gamma} = -\gamma_0 \omega^2 e^{i\omega t} \quad (8)$$

$$\tau = (G' + iG'')\gamma \quad (9)$$

则

$$G = \tau / \gamma = G' + iG''^{[7]} \quad (10)$$

当  $\tau \geq \tau_b$  时, 淤泥质软土黏弹塑性体的流变方程为

$$\eta_1 \eta_2 \ddot{\gamma} = (\eta_1 + \eta_2) \dot{\tau} - E \eta_2 \dot{\gamma} + E(\tau - \tau_b) \quad (11)$$

代入流变方程, 有:

$$-\eta_1 \eta_2 \gamma_0 \omega^2 e^{i\omega t} = (\eta_1 + \eta_2) i\omega \tau_0 e^{i(\omega t + \delta)} - E \eta_2 i\gamma_0 \omega e^{i\omega t} + E(\tau - \tau_b) \quad (12)$$

$$G = (\tau - \tau_b) / \gamma = G' + iG'' = -\frac{\eta_1 \eta_2 \omega^2}{E} + \left( \frac{E \gamma_0 \eta_2 \omega - (\eta_1 + \eta_2) \omega \tau_0}{E \gamma_0} \right) i \quad (13)$$

$$G' = -\frac{\eta_1 \eta_2 \omega^2}{E} \quad (14)$$

式中: “-” 表示外力对淤泥质软土做功。

$$G'' = \frac{E \gamma_0 \eta_2 \omega - (\eta_1 + \eta_2) \omega \tau_0}{E \gamma_0} \quad (15)$$

$$\tan \delta = \frac{G''}{G'} = \frac{E \gamma_0 \eta_2 - (\eta_1 + \eta_2) \tau_0}{\gamma_0 \eta_1 \eta_2 \omega} \quad (16)$$

### 3.2.2 能量储存与能量耗散

一个周期内储存的弹性能与储能模量有关<sup>[7]</sup>, 储存弹性能为

$$W_t = \frac{1}{2} G' \gamma_0^2 \quad (17)$$

$$W_t = \frac{1}{2} G' \gamma_0^2 = -\frac{\eta_1 \eta_2 \omega^2}{2E} \gamma_0^2 \quad (18)$$

一个周期内耗散的能量为剪切力在单位体积上所做的功, 且耗散的能量为

$$W_s = \pi G'' \gamma_0^2 = \pi \gamma_0 \frac{E \gamma_0 \eta_2 \omega - (\eta_1 + \eta_2) \omega \tau_0}{E} \quad (19)$$

式中:  $\gamma_0$  为一个周期内应变振幅的极大值。

### 3.2.3 能量耗散率与能量耗散比

能量耗散率  $D$  为单位时间内耗散的能量<sup>[7]</sup>:

$$D = \frac{W_s}{T} = \pi G'' \gamma_0^2 \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2} \omega G'' \gamma_0^2 = \frac{E \eta_2 \omega^2 \gamma_0^2 - \omega^2 \gamma_0 \tau_0 (\eta_1 + \eta_2)}{2E} \quad (20)$$

能量耗散比  $Z$  指一个循环中耗散的能量与储存弹性能的最大值  $W_t$  之比:

$$Z = \frac{2\pi G'' \gamma_0^2}{G' \gamma_0^2} = 2\pi \frac{G''}{G'} = 2\pi \frac{E \gamma_0 \eta_2 - (\eta_1 + \eta_2) \tau_0}{\eta_1 \eta_2 \gamma_0 \omega} \quad (21)$$

## 4 动态流变参数影响因素及测试分析

### 4.1 影响因素与测试方案

厦门岛土地使用面积有限, 因城市建设发展需要移山填海, 形成了数十平方公里的人造场地, 局部地段软黏土或淤泥厚达十多米<sup>[8]</sup>。东渡国际旅游码头修建在填埋处理的泥砂软土层上, 环东海域整治开发建设工程大部分建设在沉积软土地基上, 这些软弱地基在外部动态载荷的共同作用下表现为动态流变特性, 对工程的稳定性和安全性构成极大的威胁。

淤泥质软土动态流变参数的影响因素有动态荷载的作用模式、作用频率、最大作用力或最大应变幅值、淤泥质软土的颗粒组成与级配、含水率等。本次测试先考察动态剪切力作用频率、动态剪切应变、淤泥质软土含水率等因素对动态流变参数的影响特性。测试样本采用人工制备的淤泥质软土, 其中粉粒占固体组分的 70 %, 黏粒占固体组分的 30 %, 含水率分别为 26 %, 24 % 等。采用 MCR-300 型流变仪进行测试。考虑到自然界中实际动态荷载作用情况, 以常见的正弦激励动态剪切力作为动态条件。首先测试淤泥质软土含水率为 24 %、动态剪切应变分别为 0.5 % 和 1.0 % 的条件下动态剪切作用频率对动态流变参数的影响特性; 然后测试动态剪切作用频率为 5 Hz、淤泥质软土含水率分别为 26 % 和 24 % 条件下动态剪切应变对动态流变参数的影响特性。

### 4.2 动态流变参数测试分析

4.2.1 不同剪切应变条件下动态作用频率对黏弹性流变参数的影响

淤泥质软土含水率固定为 24 %, 剪切应变分别

控制在 0.5 % 和 1 % 等不同条件下测试动态作用频率对黏弹性流变参数的影响结果见图 2 和图 3 所示。

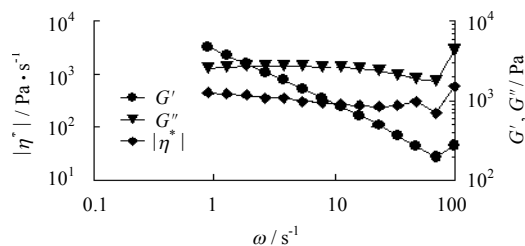


图 2 剪切应变 0.5 %, 黏弹性参数与动态剪切频率的关系

Fig.2 Shear strain 0.5 %, viscoelastic parameters and dynamic shear frequency

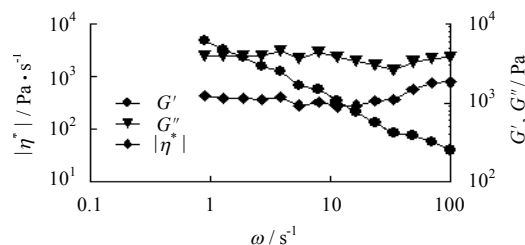


图 3 剪切应变 1 %, 黏弹性参数与动态剪切频率的关系

Fig.3 Shear strain 1 %, viscoelastic parameters and dynamic shear frequency

测试频率范围内, 储能模量、损耗模量随动态剪切作用频率的增大而呈小幅上升的趋势, 且储能模量高于损耗模量。从分子运动的角度看, 在测试频率范围内, 应力变化频率的倒数比淤泥质软土塑性流动的松弛时间小, 淤泥质软土运动跟不上应力的变化, 细颗粒未能及时进行重新排列, 对应力的响应只振动, 来不及产生流变, 伴随淤泥质软土运动的能量损耗较小, 因此, 储能模量高于损耗模量, 宏观上显示黏弹性固体的性质。

而复合黏度随剪切作用力频率的增大而降低, 呈剪切稀化现象; 当剪切频率增大到某临界值时, 复合黏度开始增大, 呈现剪切增稠现象。从分子运动和微观结构方面分析, 对静止后的淤泥质软土, 粗细颗粒的相对位置、孔隙大小、吸附阳离子和水分子的排列等均处于一种相对平衡状态。当受到剪切作用时, 颗粒间产生滑动位移, 破坏了原来的相对平衡, 软土从絮凝状态变成某种程度的分散结构, 从而削弱了颗粒间的结构连接, 粒子倾向于有规则的排列, 导致结构强度的降低, 表现为剪切稀化。当剪切作用频率增大到某临界值时, 有规则的排列

被打乱, 许多颗粒被搅在一起, 形成了暂时性的似絮凝结构, 一方面增大了颗粒流变的摩擦力; 另一方面体积膨胀, 增大了颗粒之间的孔隙, 使得原有的水分不足以填充所有孔隙而使系统黏度增大, 表现为剪切增稠。

#### 4.2.2 黏弹性流变参数与含水率

动态剪切作用频率固定在 5 Hz, 淤泥质软土含水率分别为 26 % 和 24 % 等不同条件下测试剪切应变对黏弹性参数的影响结果见图 4 和图 5。

结果表明, 在测试应变范围内, 储能模量、损耗模量随剪切应变的增大逐步下降; 而随着含水率由 26 % 降低到 24 % 后, 储能模量、损耗模量明显增大。这是由于含水率越小, 颗粒之间的距离越近, 相互作用越强烈, 微观结构更加致密, 更接近固体的性质, 导致储能模量、损耗模量相应增大。

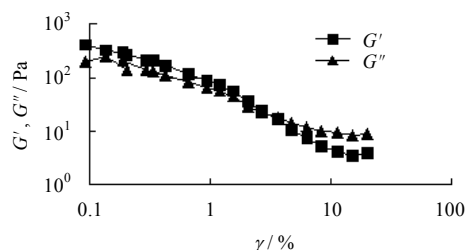


图 4 频率 5 Hz, 26 % 含水率, 黏弹性参数与动态剪切应变的关系

Fig.4 Frequency 5 Hz, water content 26 %, viscoelastic parameters and dynamic shear strain

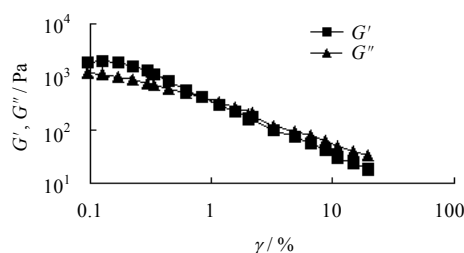


图 5 频率 5 Hz, 24 % 含水率, 黏弹性参数与动态剪切应变的关系

Fig.5 Frequency 5 Hz, water content 24 %, viscoelastic parameters and dynamic shear strain

## 5 结 论

(1) 动态载荷作用加速软弱岩土流变行为, 更容易引发岩土工程灾害和地质灾害, 成为导致岩土地质灾害的重要因素和直接外部动力。只有结合实际动态载荷作用情况, 深入研究软弱岩土动态流变特性及其影响因素, 揭示其加速流变并导致岩土地质灾害的机制, 研究结果才更具有理论和实际指导

意义。

(2) 建立了淤泥质软土的动态黏弹塑性流变力学模型和流变方程,并以动态剪切载荷为例,推导出动态流变参数的计算表达式,为进一步揭示软弱岩土突发地质灾害的流变动力学机制奠定了基础。

(3) 动态流变参数测试结果表明,储能模量、损耗模量随动态作用频率的增大而有小幅增加,且储能模量高于损耗模量,宏观上显示黏弹性固体的性质。

(4) 在测试频率范围内复合黏度随剪切作用力频率的增大而降低,呈剪切稀化现象;当剪切频率增大到某临界值时,复合黏度开始增大,呈现剪切增稠现象。

(5) 在测试应变范围内,储能模量、损耗模量随剪切应变的增大逐步下降;而随着含水率由 26 % 降低到 24 % 后,储能模量、损耗模量反而增大。这是由于含水率越小,颗粒之间的距离越近,相互作用越强烈,微观结构更加致密,更接近固体的性质,导致储能模量、损耗模量相应增大。

### 参考文献

- [1] 许强, 黄润秋, 王来贵. 外界扰动诱发地质灾害机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(2): 280—284.  
XU Qiang, HUANG Run-qiu, WANG Lai-gui. Mechanism analysis on geological hazards triggered by external disturbance[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(2): 280—284.
- [2] 张军辉, 缪林昌. 连云港海相软土流变特性试验及双曲面流变模型[J]. 岩土力学, 2005, 26(1): 145—149.  
ZHANG Jun-hui, MIAO Lin-chang. Tests on rheological behavior of lianyungang marine soft clay and two-yield-surface rheological model[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(1): 145—149.
- [3] 胡华. 软弱岩土突发地质灾害的动态流变力学机制分析[J]. 灾害学, 2005, 20(4): 13—17.  
HU Hua. The analysis on dynamic rheologic mechanics for soft rock-soil to burst out geologic disaster[J]. **Journal of Catastrophology**, 2005, 20(4): 13—17.
- [4] 胡华. 含水率对软土流变参数影响特性与机制分析[J]. 岩土工程技术, 2005, 19(3): 134—136.  
HU Hua. The influencing characteristics and mechanism of water content on rheological parameters of soft-soil [J]. **Geotechnical Engineering Technique**, 2005, 19(3): 134—136.
- [5] 巫德斌, 徐卫亚, 朱珍德, 等. 泥板岩流变试验与黏弹性本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(8): 1 242—1 246.  
WU De-bin, XU Wei-ya, ZHU Zhen-de, et al. Study on rheological test and viscoelastical constitutive model for shale[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(8): 1 242—1 246.
- [6] 胡华. 动载作用下淤泥质软土流变模型与流变方程[J]. 岩土力学, 2007, 28(2): 237—240.  
HU Hua. The rheological model and rheological equation of sullage soft soil under dynamic loading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(2): 237—240.
- [7] 周光泉, 刘孝敏. 黏弹性理论[M]. 北京: 中国科技大学出版社, 1996.
- [8] 曹继东, 陈正汉, 王权民, 等. 厦门软黏土的振陷特性研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(1): 160—164.  
CAO Ji-dong, CHEN Zhen-han, WANG Quan-min, et al. Study on characteristics of seismic depression of soft clay in Xiamen[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(1): 160—164.

## 中国首个在海岛上建设的核电站动工, 总投资 512 亿元

被正式列入《国家核电中长期发展规划(2005 年~2020 年)》中的福建宁德核电站于 2008 年 2 月 18 日正式动工。

项目位于福建省宁德市辖福鼎市秦屿镇的备湾村, 濒临东海, 南距福州 143 km, 北距温州 113 km, 是我国第一个在海岛上建设的核电站。

据介绍, 宁德核电站 1 期 4 台百万千瓦级机组工程总投资为 512 亿元, 是福建省有史以来最大的能源投资项目, 由广东核电投资有限公司、大唐国际发电股份有限公司、福建煤炭工业(集团)有限责任公司共同投资建设。1 期 4 台机组定位为核电第二代加改进, 综合国产化率达到 75 %, 具有国际同类型在役核电站的先进水平。

2008 年 2 月开工建设 1 号和 2 号机组, 1 号机组 2012 年投产, 2 号机组 2013 年投产; 计划 3 号机组 2014 年投产, 4 号机组 2015 年投产。

(转自 人民日报)