

# 中美混凝土道路设计、计算与比较

温国标<sup>✉</sup>

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

**摘要:** [目的] 为了找出采用中美两国规范在混凝土道路结构计算上的差异, 寻求在混凝土道路结构计算问题上中国规范替代美国规范的可能性, 使得中国规范能够在世界范围更广泛地应用。[方法] 通过中美两国规范混凝土道路设计的理论原理、设计过程的比较, 再分别采用中国规范和美国规范的方法来计算同一个工程例子, 比较设计结果, 得出结论。[结论] 经过比较发现, 按中国规范和美国规范计算得出的结果很接近, 中国规范相对更保守一点, 更有利于提高混凝土道路的使用寿命。[结论] 在国外项目的设计中, 混凝土路面结构的计算中国标准可以代替美国标准, 我们可以大胆地使用中国规范, 让中国规范走向世界。

**关键词:** 混凝土道路; 弹性地基板理论; 公路服务能力; 道路结构计算

中图分类号: TM611; U415.6

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2020)04-0113-07

开放科学(资源服务)识别码(OSID):



## Design, Calculation and Comparison of Concrete Road in China and America

WEN Guobiao<sup>✉</sup>

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

**Abstract:** [Introduction] The purpose of this paper is finding out the differences in the calculation of concrete road structure between Chinese codes and American codes, looking for the possibility of Chinese code to replace American code in the calculation of concrete road structure, making Chinese codes more widely used in the world. [Method] We compared the theoretical principles and design process of concrete road design between Chinese codes and American codes, then the same project example is calculated by the methods of Chinese codes and American codes respectively, and we compared the result and got a conclusion. [Result] After comparison, we find that the results calculated by Chinese codes and American codes are very close, Chinese codes are more conservative that can increase the life of concrete roads. [Conclusion] In the concrete road design of foreign projects, Chinese codes can replace American codes. We can use Chinese codes boldly, and help them to go to the world.

**Key words:** concrete road; elastic foundation plate theory; highway service capability; road structure calculation

## 0 引言

随着国家“一带一路”战略的推行, 国内设计院的国际项目越来越多。许多国家对于中国规范还很陌生, 因此要求我们采用国际通用的规范, 例如美国规范。

对于总图专业来说, 采用美国规范进行国外项目设计面临许多挑战, 其中一个难点就是利用美国规范对混凝土道路设计与计算。

本论文根据近些年国内外项目道路设计的经验<sup>[1]</sup>, 对中美混凝土道路设计与计算进行了深入地研究与比较, 为国外项目混凝土道路的设计提供参考。

## 1 中美规范混凝土路面设计理论

### 1.1 中国规范混凝土路面设计理论(详见《公路水泥混凝土路面设计规范》JTG D40—2011<sup>[2]</sup>)

#### 1) 弹性地基板理论

由于混凝土板与基层或土基之间的摩阻力不大, 从力学模型考虑, 可以把除粒料类基层外, 其他各类基层与混凝土面层按分离式双层弹性地基板

收稿日期: 2020-03-30 修回日期: 2020-06-05

基金项目: 中国能建广东院科技项目“中国电力设计标准与国际标准和国外先进标准比较研究(发电土建部分)”(ER00101W)

模型进行结构分析。

## 2) 混凝土板损坏的主要因素

混凝土的弯拉强度远小于抗压强度，为其 1/7~1/6，混凝土板易受弯拉应力产生断裂和裂缝。

经工程实践发现，导致混凝土板断裂和裂缝的主要因素是重复荷载应力和温度应力综合作用所产生的疲劳损坏。

## 3) 混凝土路面设计公式

$$\gamma_r(\sigma_{pr} + \sigma_{tr}) \leq f_r \quad (1)$$

$$\gamma_r(\sigma_{p,max} + \sigma_{t,max}) \leq f_r \quad (2)$$

这两个公式的意思分别是：

公式(1)：在一定的可靠度下面层板在临界荷位处产生的行车荷载疲劳应力和温度梯度疲劳应力之和不大于弯拉强度。

公式(2)：在一定的可靠度下最重的轴载在临界荷位处产生的行车荷载疲劳应力和所在地区最大温度梯度在临界荷位处产生的最大温度翘曲应力之和不大于弯拉强度。

当混凝土面板厚度及各参数的代入值满足上述两个公式，则混凝土结构计算通过。

## 1.2 美国 AASHTO 规范混凝土路面设计理论

### 1) 服务能力下降分析

与中国规范以混凝土面层是否损坏来评价道路的性能不同，美国规范引入了服务能力这个概念。美国规范认为道路结构设计应该使得设计周期内道路的服务能力损失在可接受的范围内。根据 AASHTO 道路试验结果，道路的服务能力损失与以下因素有关：交通量、设计可靠度、混凝土板厚度及其参数、有效路基反应模量、路面排水系数和路面荷载传递能力等。

### 2) 美国规范混凝土道路设计公式

根据上述分析服务能力损失的因素，AASHTO 经过一系列实验，将上述关系形成一个公式，通过下列公式(3)计算混凝土面层厚度  $D$ ：

$$\log_{10} W_{18} = Z_R S_0 + 7.35 \log_{10} (D + 1) - 0.06 + \frac{\log_{10} \left[ \frac{\Delta PSI}{P_0 - 1.5} \right]}{1 + \frac{1.624 \times 10^7}{(D + 1)^{8.46}}} + (4.22 - 0.32 P_t) \log_{10}$$

$$\left[ \frac{S'_c c_d [D^{0.75} - 1.132]}{215.63 J [D^{0.75} - \frac{18.42}{(E_c/k)^{0.25}}]} \right] \quad (3)$$

## 2 中美规范混凝土路面设计过程

### 2.1 中国规范混凝土路面设计过程

中国规范混凝土路面设计过程见图 1。

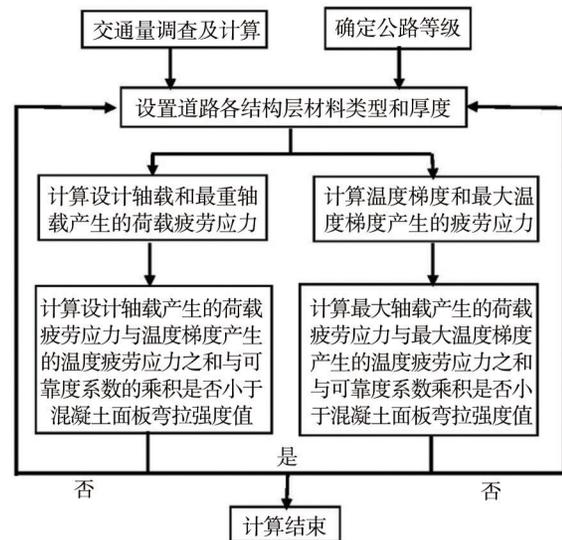


图 1 中国规范混凝土路面设计过程

Fig. 1 Concrete pavement design process in Chinese codes

### 2.2 美国规范混凝土路面设计过程

美国规范混凝土路面设计过程见图 2。

## 3 设计实例

### 3.1 设计条件

印尼某项目，项目规模 2×670 MW 燃煤机组，本期建设 1 台机组。燃煤采用海路运输。灰场位于厂址内，但是考虑部分综合利用，采用汽车运输。

每天约 200 辆车进出厂区，其中一半是货车。货车分为普通货车、中型货车和重型货车，三种货车的日交通量分别为 50 辆/天、40 辆/天和 10 辆/天。运灰（油）车辆的日交通量为 23 辆/天。其余交通车辆是上下班交通的小汽车和摩托车。

下面分别用中国规范和美国规范进行计算。

### 3.2 中国规范计算

根据《公路水泥混凝土路面设计规范》<sup>[2]</sup>（下

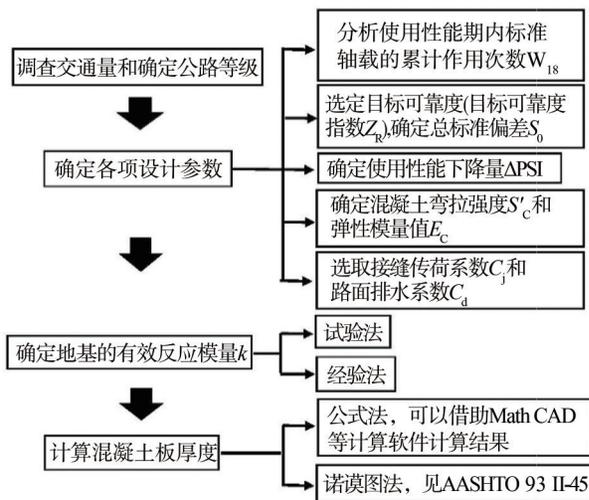


图2 美国规范混凝土路面设计过程

Fig. 2 Concrete pavement design process in American codes

简称《混凝土规范》) JTG D40—2011的方法计算。

### 3.2.1 交通量计算

以100 kN单轴——双轮组荷载作为设计轴载各级轴载作用次数 $N_i$ ,可按下式换算为设计轴载的作用次数 $N_s$ :

$$N_s = \sum_{i=1}^n N_i \left( \frac{P_i}{P_s} \right)^{16} \quad (4)$$

其中普通货车的设计轴载日作用次数:

$$N_1 = \left[ \left( \frac{40}{100} \right)^{16} + \left( \frac{80}{100} \right)^{16} + \left( \frac{80}{100} \right)^{16} \right] \times 50 = 3$$

中型货车的设计轴载日作用次数:

$$N_2 = \left[ \left( \frac{40}{100} \right)^{16} + \left( \frac{130}{100} \right)^{16} + \left( \frac{130}{100} \right)^{16} \right] \times 40 = 5\,323.2$$

重中型货车的设计轴载日作用次数:

$$N_3 = \left[ \left( \frac{40}{100} \right)^{16} + \left( \frac{160}{100} \right)^{16} \right] \times 10 = 18\,446.7$$

运灰(油)车的设计轴载日作用次数:

$$N_4 = \left[ \left( \frac{80}{100} \right)^{16} + \left( \frac{130}{100} \right)^{16} + \left( \frac{130}{100} \right)^{16} + \left( \frac{130}{100} \right)^{16} \right] \times 23 = 4\,591.95$$

代入(4)式,得 $N_s=28\,364.85$

设计基准期内设计车道设计轴载累计作用次数

$$N_c = N_s \times (1 + g_r)^{t-1} \times 365 \times \eta \div g_r \quad (5)$$

其中交通年增长率为0,设计周期 $t$ 为30年,7 m宽道路车辆轮迹横向分布系数 $\eta=0.6$ 代入上式得 $N_c=18\,636$ 万次。交通荷载等级为特重。

### 3.2.2 初拟道路结构

先按以下方案进行道路结构初步设计:

1) 考虑到特重的交通级别,按二级公路考虑道路结构设计。

2) 道路结构层如下:

250 mm厚混凝土面层;180 mm厚水泥稳定碎石层;150 mm厚级配碎石层。

3) 混凝土弯拉强度考虑按4.5 MPa设计。

考虑到特重的交通级别,地基回弹模量取80 MPa。

### 3.2.3 板底地基当量回弹模量计算

1) 路床顶综合回弹模量 $E_0$

路基回弹模量为80 MPa。

本工程路基以低液限粉土和碎石、砾石为主,路床顶距地下水位1 m,查《混凝土规范》<sup>[2]</sup>附表E.0.1-2,得综合路基回弹模量调整系数为0.8。

路床顶综合回弹模量 $E_0=80 \times 0.8=64$  MPa。

2) 板底地基当量回弹模量 $E_t$

板底地基当量回弹模量指粒料层(级配碎石层)与路基的综合回弹模量。查《混凝土规范》<sup>[2]</sup>附表E.0.2得级配碎石层回弹模量 $E_x=220$  MPa。厚度 $h_x=0.15$  m。按公式(6)计算板底地基当量回弹模量 $E_t$ :

$$E_t = E_0 \left( \frac{E_x}{E_0} \right)^{(0.26 \ln h_x + 0.86)} \quad (6)$$

计算得 $E_t=100.66$ ,取整100 MPa。

### 3.2.4 弯曲刚度和刚度半径计算

1) 上层板(混凝土面板)弯曲刚度 $D_c$

查《混凝土规范》<sup>[2]</sup>表3.0.8,混凝土板4.5 MPa弯拉强度对应的弯拉弹性模量 $E_c$ 是29 GPa。混凝土的泊松比 $\nu_c$ 为0.15,混凝土层厚度 $h_c$ 为0.25 m。上层板的弯曲刚度 $D_c$ 计算公式如下:

$$D_c = E_c \times h_c^3 / [12 \times (1 - \nu_c^2)] \quad (7)$$

计算得 $D_c=38.63$  MN。

2) 下层板(水泥稳定碎石基层)弯曲刚度 $D_b$

查《混凝土规范》<sup>[2]</sup>附表E.0.2-2,水泥稳定碎石层弹性模量 $E_b$ 为1.5 GPa。水泥稳定碎石的泊松比 $\nu_b$ 为0.18,水泥稳定碎石层厚度 $h_b$ 为0.18 m。下层板的弯曲刚度 $D_b$ 计算公式如下:

$$D_b = E_b \times h_b^3 / [12 \times (1 - \nu_b^2)] \quad (8)$$

计算得 $D_b=0.76$  MN。

3)混凝土面层的刚度半径 $r_g$

$$r_g = 1.21 \left( \frac{D_c + D_b}{E_t} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (9)$$

计算得 $r_g=0.887$  m。

### 3.2.5 荷载应力计算

1)设计轴载在临界荷位处产生的荷载应力 $\sigma_{ps}$

设计轴载 $P_s$ 为100 kN,设计轴载在临界荷位处产生的荷载应力 $\sigma_{ps}$ 见下式:

$$\sigma_{ps} = (1.45 \times 10^{-3}) / \left(1 + \frac{D_b}{D_c}\right) \times r_g 0.65 h_c^{-2} P_s^{0.94} \quad (10)$$

计算得 $\sigma_{ps}=1.597$  MPa。

2)最重轴载在临界荷位处产生的荷载应力 $\sigma_{pm}$

设计轴载 $P_m$ 为160 kN,设计轴载在临界荷位处产生的荷载应力 $\sigma_{pm}$ 见下式:

$$\sigma_{pm} = (1.45 \times 10^{-3}) / \left(1 + \frac{D_b}{D_c}\right) \times r_g 0.65 h_c^{-2} P_m^{0.94} \quad (11)$$

计算得 $\sigma_{pm}=2.483$  MPa。

3)各系数计算、取值

接缝传荷能力的应力折减系数 $k_f$ ,采用混凝土路肩 $k_f$ 取值0.87~0.92,路肩面层与路面等厚时取低值,减薄时取高值。本工程取0.92。

材料疲劳系数 $\lambda$ ,按《混凝土规范》<sup>[2]</sup>附表B.2.3,混凝土取0.057。

疲劳应力系数见下式:

$$k_f = N_e^\lambda \quad (12)$$

计算得 $k_f=2.961$ 。

综合系数 $k_c$ ,根据《混凝土规范》<sup>[2]</sup>表3.0.1,二级公路 $k_c$ 取1.05。

4)荷载疲劳应力见下式:

$$\sigma_{pr} = k_f \times k_r \times k_c \times \sigma_{ps} \quad (13)$$

计算得 $\sigma_{pr}=4.318$  Mpa。

最大荷载疲劳应力见下式:

$$\sigma_{pmax} = k_f \times k_c \times \sigma_{pm} \quad (14)$$

计算得 $\sigma_{pmax}=2.269$  MPa。

### 3.2.6 温度应力系数计算

印尼沿海属于热带海洋气候,类似于我国公路自然区划中的IV区——东南潮湿区。查《混凝土规范》<sup>[2]</sup>表3.0.10得最大温度梯度 $T_g=92$ 。根据下式:

$$t = \frac{L}{3r_g} \quad (15)$$

计算得 $t=1.879$  ( $L$ 为混凝土板长5 m)。

层间与基层之间竖向接触刚度见下式:

$$k_n = \frac{1}{2} \left( \frac{h_c}{E_c} + \frac{h_b}{E_b} \right) - 1 \quad (16)$$

计算得 $k_n=3887.4$  MPa/m。

层间接触状况参数见下式:

$$r_\beta = \left( \frac{D_c D_b}{(D_c + D_b) k_n} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (17)$$

计算得 $r_\beta=0.118$  m。

层间接触状况参数见下式:

$$\xi = - \frac{(k_n r_g^4 - D_c) r_g^3}{(k_n r_\beta^4 - D_c) r_g^3} \quad (18)$$

计算得 $\xi=0.146$ 。

混凝土面层板的温度翘曲应力系数见下式:

$$C_L = 1 - \left( \frac{1}{1 + \xi} \right) - \frac{\sin ht \cos t + \cos ht \sin t}{\cos t \sin t + \sin ht \cos ht} \quad (19)$$

计算得 $C_L=0.814$ 。

内应力的温度应力系数见下式:

$$B_L = 1.77 e^{-4.48 h_c} C_L - 0.131 (1 - C_L) \quad (20)$$

计算得 $B_L=0.446$  (其中 $h_c$ 为混凝土板厚度0.25)。

### 3.2.7 温度应力计算

本工程混凝土粗集料主要为花岗岩,查《混凝土规范》<sup>[2]</sup>附表E.0.3-2,得水泥混凝土线膨胀系数 $\alpha_c$ 为 $10 \times 10^{-6}$ 。

最大温度应力见下式:

$$\sigma_{t,max} = \frac{\alpha_c E_c h_c T_g}{2} B_L \quad (21)$$

计算得 $\sigma_{t,max}=1.49$  MPa。

查《混凝土规范》<sup>[2]</sup>附表B.3.4,根据本工程公路区划类似IV区,得回归系数:

$$a_t=0.841, b_t=1.323, c_t=0.058$$

温度疲劳应力系数见下式:

$$k_t = \frac{f_r}{\sigma_{t,max}} \left[ a_t \left( \frac{f_r}{\sigma_{t,max}} \right) b_t - c_t \right] \quad (22)$$

计算得 $k_t=0.412$  (其中 $f_r$ 为混凝土弯拉强度4.5 MPa)。

温度疲劳应力见下式:

$$\sigma_{tr} = k_t \sigma_{t,max} \quad (23)$$

计算得 $\sigma_{tr}=0.613$  MPa。

### 3.2.8 校核计算结果

本工程道路结构按二级公路设计,查《混凝土规范》<sup>[2]</sup>表3.0.1,目标可靠度取85%,查3.0.2,二级公路变异水平等级取中级。

根据变异水平和目标可靠度,可靠度系数 $\gamma_r$ 取1.13。

最后校核路面极限状态:

$$\gamma_r(\sigma_{pr} + \sigma_{tr})=5.57 \geq f_i=4.5, \text{ 不满足}$$

$$\gamma_r(\sigma_{p,max} + \sigma_{t,max})=4.24 \leq f_i=4.5, \text{ 满足}$$

第一个公式不满足需要调整道路结构设计。

### 3.2.9 调整路面结构设计及比选

回到4.2.2,先调整混凝土路面结构,将混凝土面层厚度逐渐加厚0.01 m,然后再次进行验算,当混凝土厚度加厚到0.29 m时,

$$\gamma_r(\sigma_{pr} + \sigma_{tr})=4.32 \leq f_i=4.5, \text{ 满足要求。}$$

因此本工程混凝土结构面层方案一为:

混凝土面层290 mm,水泥稳定碎石层180 mm,级配碎石层150 mm。

还有一种方案,将混凝土面层调整至0.28 m,然后调整基层厚度。

先调整水泥稳定碎石层厚度,当该层厚度加大到0.32 m时,满足要求。

因此本工程混凝土结构面层方案二为:

混凝土面层280 mm,水泥稳定碎石层320 mm,级配碎石层150 mm。

计算中发现,调整级配碎石层对结果影响非常小,因此不再考虑加厚级配碎石层的方案。

上述两个方案,方案一道路结构层厚度比方案二小130 mm,因此最终选择方案一。

## 3.3 美国规范(AASHTO)计算

### 3.3.1 交通分析

1)各车型标准设计轴载当量作用次数

本例采用美标标准设计轴载80 kN作为设计轴载,各车型标准设计轴载当量作用次数根据AASHTO GDPS—1993<sup>[3]</sup> APPENDIX D查表可以算得:普通货车2.057 kN,中型货车19.037 kN,重型货车17.157 kN,运灰(油)车29.47 kN。

2)设计周期内当量轴载作用次数( $w_{18}$ )

设计周期30年,与电厂一致。厂区交通量相对固定,因此不考虑交通量的增长。设计周期内当量轴载作用次数

$$w_{18}=(2.057+19.037+17.157+29.47)$$

$$\times 50 \times 365 = 18\ 765\ 126$$

### 3.3.2 可靠度指数 $Z_R$ 和总标准方差 $S_0$

电厂进厂公路虽然属于地方公路,但是由于进厂公路交通量较大,结构设计上提高一个等级,按次干道公路取值,这里可靠度 $R$ 取90%,对应的可靠度指数 $Z_R$ 见AASHTO GDPS—1993<sup>[3]</sup> I—62 Table 4.1,取-1.282。

总标准方差 $S_0$ ,根据AASHTO GDPS—1993<sup>[3]</sup>,混凝土路面推荐值为0.35。

### 3.3.3 服务能力变化量 $\Delta PSI$

初始服务能力 $P_0$ ,服务能力是指路面对于使用该道路的各种交通工具的服务能力。根据AASHTO Road Test的结果,水泥混凝土路面的 $P_0$ 值一般取4.5,最终服务能力 $P_t$ 一般取2.5,服务能力变化量见下式:

$$\Delta PSI = P_0 - P_t \quad (24)$$

计算得 $\Delta PSI=4.5-2.5=2.0$ 。

### 3.3.4 接缝传荷系数 $J$

本工程采用接缝式素混凝土路面,不设路肩,但是路边设路平石和铺砌人行道,对道路的横向支撑作用等同于硬路肩,因此 $J$ 值按不带传力杆的混凝土路肩取值,根据AASHTO GDPS—1993<sup>[3]</sup> II—26 Table 2.6,取值3.8。

### 3.3.5 路面排水系数 $C_d$

本工程处于热带海洋气候区,降雨量很大。道路采用排水边沟排水,因此排水质量按“极佳”等级;由于降雨量很大,路面结构暴露的比例按大于25%选用。根据AASHTO GDPS—1993<sup>[3]</sup> II—26 Table 2.5,取 $C_d=1.10$ 。

### 3.3.6 地基有效反应模量 $K$

极端地基有效反应模量需要建立土壤回弹模量与湿度的关系,通过估算各月份地基湿度来得到一年中的地基反应模量(AASHTO GDPS—1993<sup>[3]</sup> II—37),具体计算表见AASHTO GDPS—1993<sup>[3]</sup> II—43。

本例由于缺乏实验数据,因此采用低等级道路AASHTO推荐值来代替(AASHTO GDPS—1993<sup>[3]</sup> II—81)。

本例工程厂区场地半填半挖,采用开山土石回填,以粉质粘土、砾石、块石为主,道路路基条件较好。



李克强总理在2015年视察中国能建广东院时指示,不但要让中国的电力设备走出去,还要让中国的标准走出去。为此,我们不但要了解国际通用的规范,还要做好对比,了解两种规范的特点。只有这样,才能在合同谈判的时候,更好地说服海外的业主采用中国的规范,让中国的规范走向世界。

#### 参考文献:

- [1] 马开志,周向阳. 山地风电场运输道路设计要点分析[J]. 南方能源建设,2018,5(增刊1):172-176.  
MA K Z,ZHOU X Y. Research on the road route design of the wind farm in mountainous area [J]. Southern Energy Construction,2018,5(Supp. 1):172-176.
- [2] 交通运输部. 公路水泥混凝土路面设计规范:JTG D40—2011 [S]. 北京:人民交通出版社,2011.  
Ministry of Transportation. Code for design of highway cement concrete pavement:JTG D40—2011 [S]. Beijing:China Communications Press,2011.
- [3] AASHTO. AASHTO guide for design of pavement structures (1993) [M]. Washington, D. C. :AASHTO,1993.

#### 作者简介:



温国标

温国标 (通信作者)

1980-, 男, 广东韶关人, 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司总图规划室主任, 高级工程师, 西安建筑科技大学交通工程(总图运输)学士, 主要从事电力工程的总图规划工作 (e-mail) g7532@gedi.com.cn。

#### 项目简介:

**项目名称** 印尼万丹670 MW燃煤机组工程

**项目概述** 该项目是中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司承担设计的670 MW超临界燃煤发电机组工程。该项目位于印度尼西亚万丹省芝拉贡市北部沿海,北临爪哇海,东距雅加达约110公里。该工程利用中国电力设计标准与国际标准和国外先进标准比较研究(发电土建部分)的对标成果,采用美国标准设计。该工程道路路面采用混凝土结构,其路面结构设计采用了美标计算方法,为《中美混凝土道路设计、计算与比较》提供了工程实例参考。

(责任编辑 李辉)

