

# 中国大坝工程学会数值模拟专委会

## 混凝土坝 BENCHMARK 研讨方案—黄登混凝土重力坝地震分析

### 1 分析对象

#### 1.1 坝体体型及断面

本次 BENCHMARK 研究以黄登混凝土重力坝为分析对象。为了方便建模和计算，选用 12#挡水坝段进行数值模拟计算。12#坝段的计算断面如图 1-1 所示，坝顶高程 1625m，坝基面高程 1422m，坝高 203m，坝顶宽 16m，正常蓄水位 1619m。

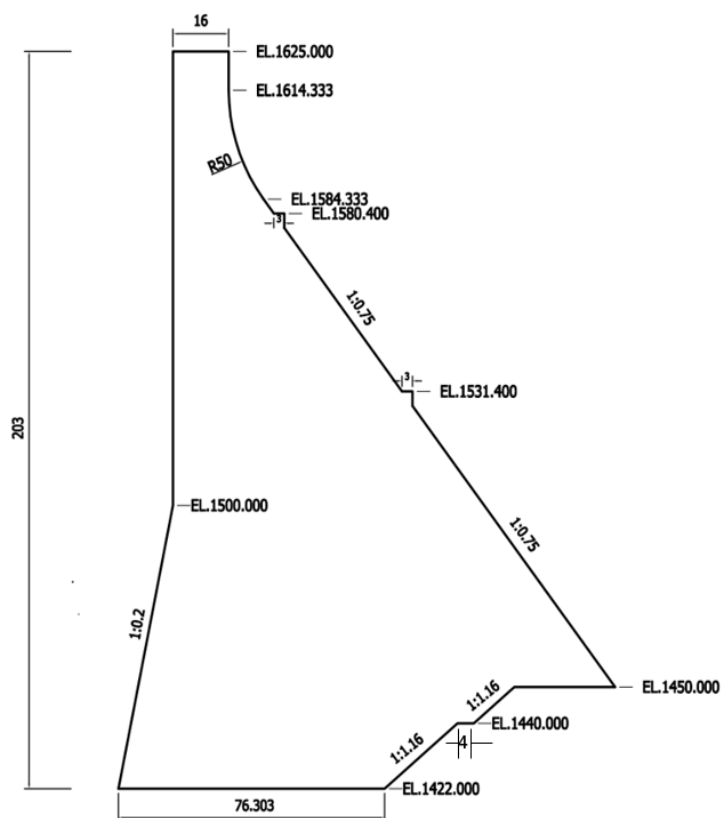


图 1-1. 12#挡水坝段断面

#### 1.2 计算模型基本要求

本次研究对象为坝体-地基-库水系统，如图 1-3 所示。计算采用平面有限元分析方法，坝体采用平面应力单元，地基采用平面应变单元。库水动水压力分别用附加质量模型和可压缩库水模型模拟。计算模型几何尺寸根据大坝截面尺寸确定，网格尺寸均为 2m。

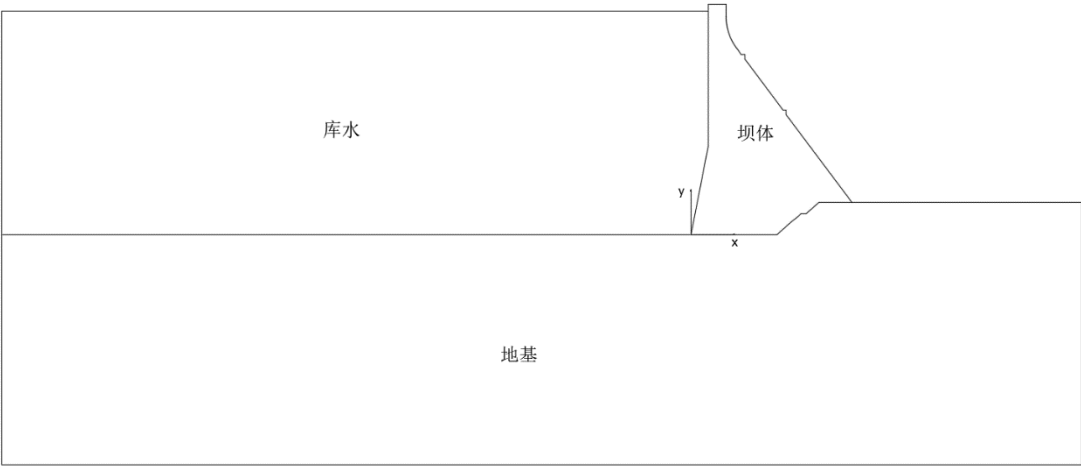


图 1-3. 坝体-地基-库水系统

1.3 材料参数

(1) 坝体混凝土

坝体不模拟分区，只采用一种混凝土材料，并假定为线弹性，材料力学参数见表 1-1。动弹模取为静弹模的 1.5 倍，阻尼比取 5%。

(2) 地基岩体

地基假定为均质线弹性介质，且忽略材料阻尼，材料参数见表 1-2。

(3) 库水

密度  $1000\text{kg/m}^3$ ，压缩波速  $1440\text{m/s}$ 。

表 1-1.坝体混凝土材料力学特性参数

静态弹性模量（GPa）	25
静态抗压强度标准（MPa）	14
静态抗拉强度标准（MPa）	1.5
容重（ $\text{kN/m}^3$ ）	24
泊松比	0.167
线膨胀系数（ $1/^\circ\text{C}$ ）	$1 \times 10^{-5}$
断裂能（N/m）	350

表 1-2.基岩材料参数

弹性模量（GPa）	15
容重（ $\text{kN/m}^3$ ）	27
泊松比	0.24

## 2.荷载条件

- (1) 坝体自重荷载
- (2) 静水压力：上游正常蓄水位 1619.00m，下游尾水位 1422.00m
- (3) 动水压力：
  - a) Westergaard 公式计算的动水附加质量
  - b) 可压缩库水单元
- (4) 地震荷载：Koyna 地震动

## 3.计算内容

本次研讨主要研究线弹性工况下重力坝的动力响应特性，非线性动力损伤为可选工况。

### 3.1 基本分析（A）

本部分从最简单的模型和条件出发，通过纯动力计算（即不考虑静力荷载）探究重力坝动力响应的特性。

#### 3.1.1 计算工况

**A-1:**假定地基为刚性，库水动水压力采用附加质量模型，如图 3-1 所示。

**A-2:**假定地基无质量，库水动水压力采用附加质量模型，如图 3-2 所示。地基从坝踵往上游方向、从坝趾往下游方向、深度方向均分别延伸 1.0 倍坝高。

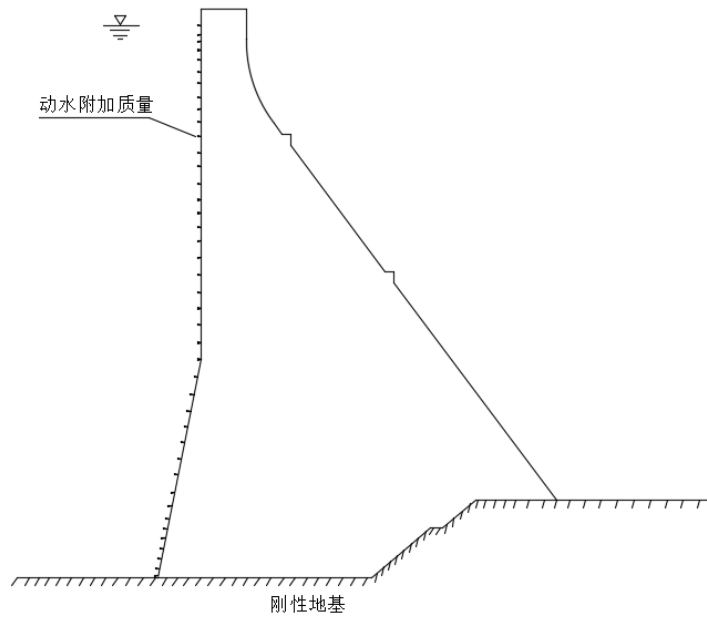


图 3-1. 刚性地基-坝体-库水系统

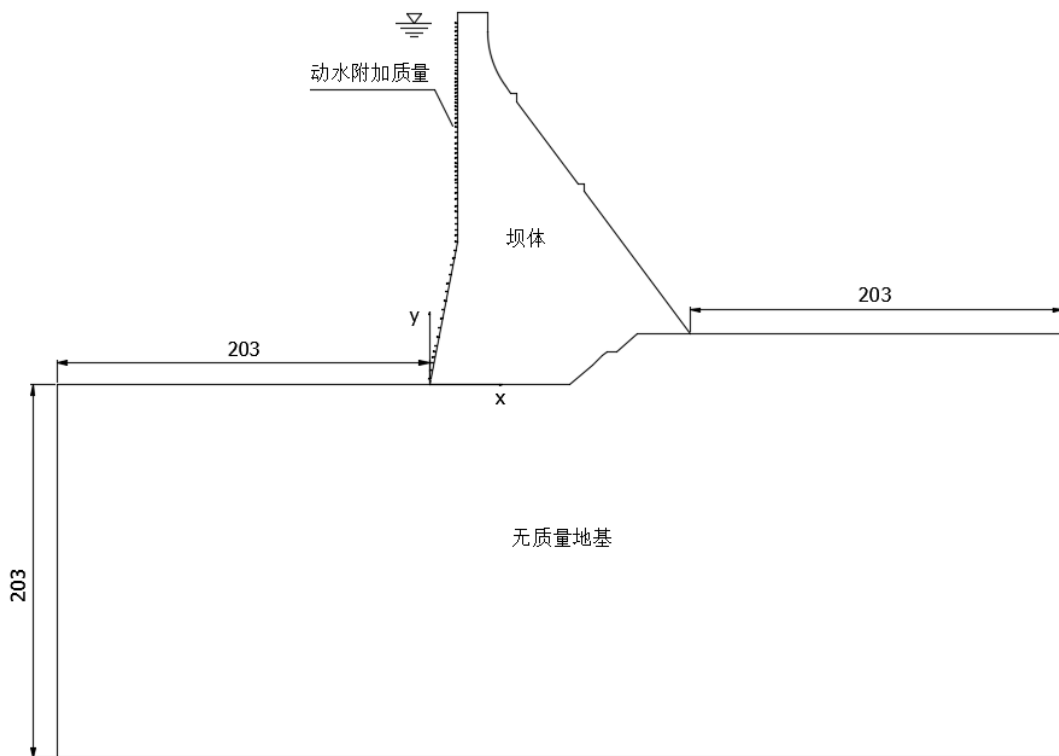


图 3-2. 无质量地基-坝体-库水系统

### 3.1.2 计算结果

- 1) 坝体的前 10 阶自振频率及振型
- 2) 坝顶点，坝踵点的加速度时程，位移时程，相对位移时程
- 3) 坝面大小主应力最大值的等值线（云）图

### 3.2 地基尺寸的敏感性分析（B）

本部分探究地基尺寸对重力坝动力响应的影响，考虑静、动荷载，地基范围为从坝踵往上游方向、从坝趾往下游方向、坝基往深度方向均分别延伸 1.5 倍、2 倍、3 倍坝高，如图 3-3 所示。

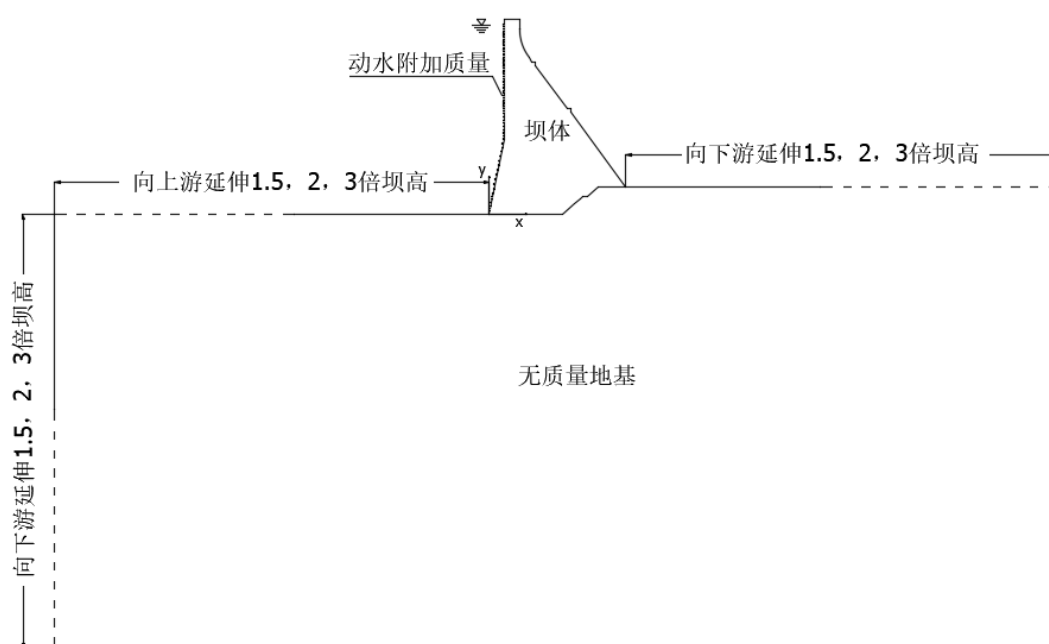


图 3-3. 无质量地基-坝体-库水系统

#### 3.2.1 计算工况

**B-1:** 地基从坝踵往上游方向、从坝趾往下游方向、深度方向均分别延伸 1.5 倍坝高

**B-2:** 地基从坝踵往上游方向、从坝趾往下游方向、深度方向均分别延伸 2.0 倍坝高

**B-3:** 地基从坝踵往上游方向、从坝趾往下游方向、深度方向均分别延伸 3.0 倍坝高

#### 3.2.2 计算结果

- 1) 坝顶点，坝踵点的加速度时程，位移时程，相对位移时程
- 2) 坝面大小主应力最大值的等值线（云）图

### 3.3 地基辐射阻尼对重力坝动力响应的影响（C）

本部分探究在地基质量的情况下，地基辐射阻尼对重力坝动力响应的影响，考虑静、动荷载，截断地基人工边界条件自选库水动水压力采用附加质量模型，如图 3-4 所示。

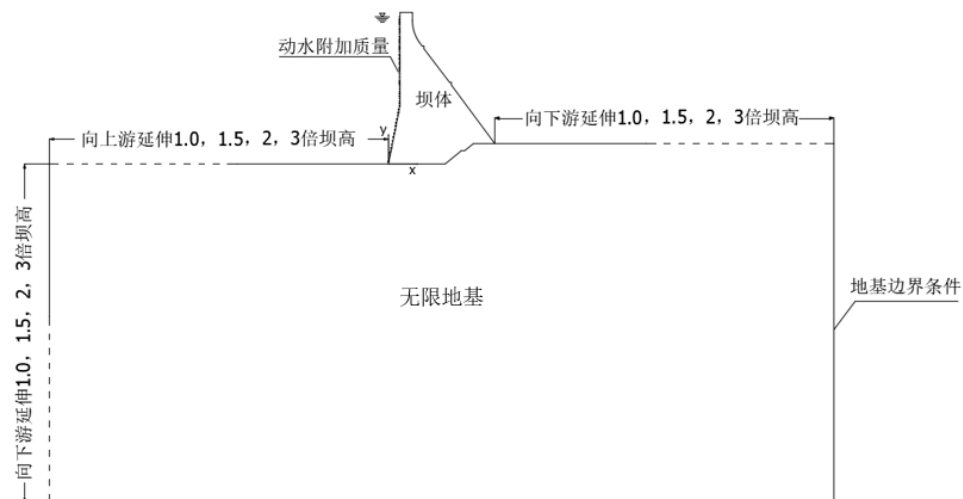


图 3-4. 有质量地基-坝体-库水系统

#### 3.3.1 计算工况

**C-1:**地基从坝踵往上游方向、从坝趾往下游方向、深度方向均分别延伸 1.0 倍坝高

**C-2:** 地基从坝踵往上游方向、从坝趾往下游方向、深度方向均分别延伸 1.5 倍坝高

**C-3:** 地基从坝踵往上游方向、从坝趾往下游方向、深度方向均分别延伸 2.0 倍坝高

**C-4:** 地基从坝踵往上游方向、从坝趾往下游方向、深度方向均分别延伸 3.0 倍坝高

#### 3.3.2 计算结果

- 1) 坝顶点，坝踵点的加速度时程，位移时程，相对位移时程
- 2) 坝面大小主应力最大值的等值线（云）图

### 3.4 库水可压缩性对重力坝动力响应的影响（D）

本系列工况分析库水的压缩性对重力坝动力响应的影响，考虑静、动荷载，不可压缩性库水采用 westergaard 附加质量模型；可压缩库水可用有限元模拟，库水密度为  $1000\text{kg/m}^3$ ，压缩波速  $1440\text{m/s}$ ，库水远端设置吸收边界，地基人工边界条件自取。

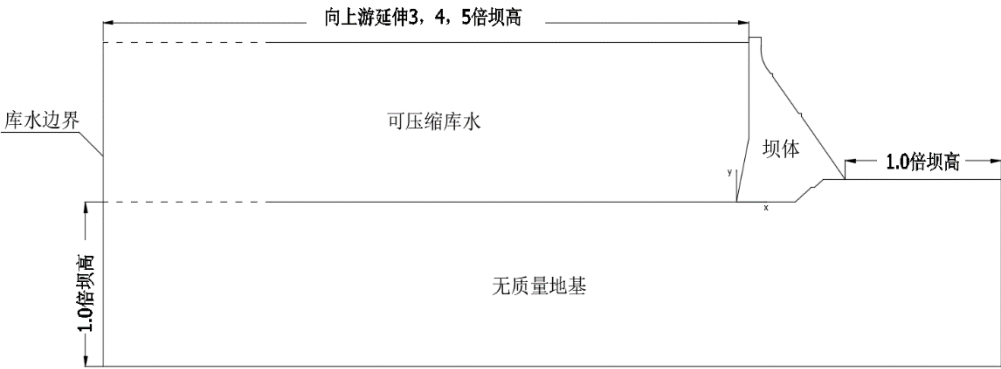


图 3-5. 无质量地基-坝体-可压缩库水系统

3.4.1 计算工况

**D-1:** 库水附加质量+地基从坝趾往下游、深度均延伸 1.0 倍坝高+地基从坝踵往上游延伸 3 倍坝高

**D-2:** 可压缩库水+地基从坝趾往下游、深度均延伸 1.0 倍坝高+地基从坝踵往上游延伸 3 倍坝高

**D-3:** 可压缩库水+地基从坝趾往下游、深度均延伸 1.0 倍坝高+地基从坝踵往上游延伸 4 倍坝高

**D-4:** 可压缩库水+地基从坝趾往下游、深度均延伸 1.0 倍坝高+地基从坝踵往上游延伸 5 倍坝高

3.4.2 计算结果:

- 1) 坝体的前 10 阶自振频率及振型
- 2) 坝顶点，坝踵点的加速度时程，位移时程，相对位移时程
- 3) 坝面大小主应力最大值的等值线（云）图

4) 坝踵点的动水压力时程

3.5 考虑材料非线性的动力损伤分析（可选）

本系列工况考虑坝体和地基材料的非线性，考虑静、动荷载，以 A-2 工况为对象，即无质量地基、附加质量动水压力模型，参与方可自主选择坝体和基岩的非线性损伤模型，对重力坝进行一倍 PGA 以及超载条件下的非线性损伤分析。地震的超载倍数可自主选择，在此不作规定。

3.5.1 计算结果

- 1) 坝顶点，坝踵点的加速度时程，位移时程，相对位移时程
- 2) 坝体裂缝分布（云）图
- 3) 坝顶最大位移随超载倍数变化的曲线

表. 计算工况汇总表

计算工况		坝体		地基											库水		
		线性	非线性	刚性	有质量				无质量					附加质量	可压缩		
					1	1.5	2	3	1	1.5	2	3	4			5	
A	A-1	√		√												√	
	A-2	√							√							√	
B	B-1	√								√						√	
	B-2	√									√					√	
	B-3	√										√				√	
C	C-1	√			√											√	
	C-2	√				√										√	
	C-3	√					√									√	
	C-4	√						√								√	
D	D-1	√										√				√	
	D-2	√										√					√
	D-3	√											√				√
	D-4	√												√			√
E			√						√							√	