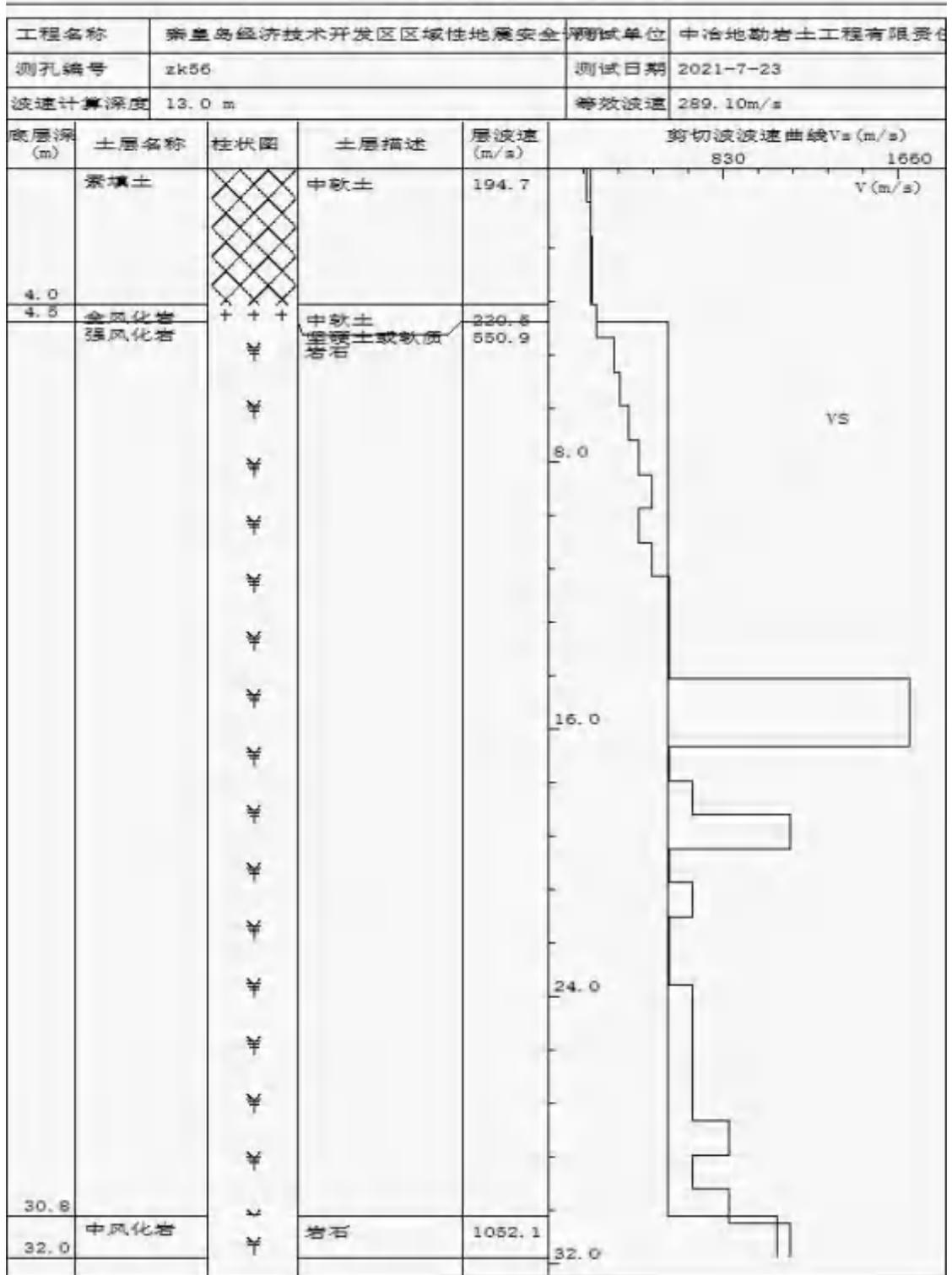
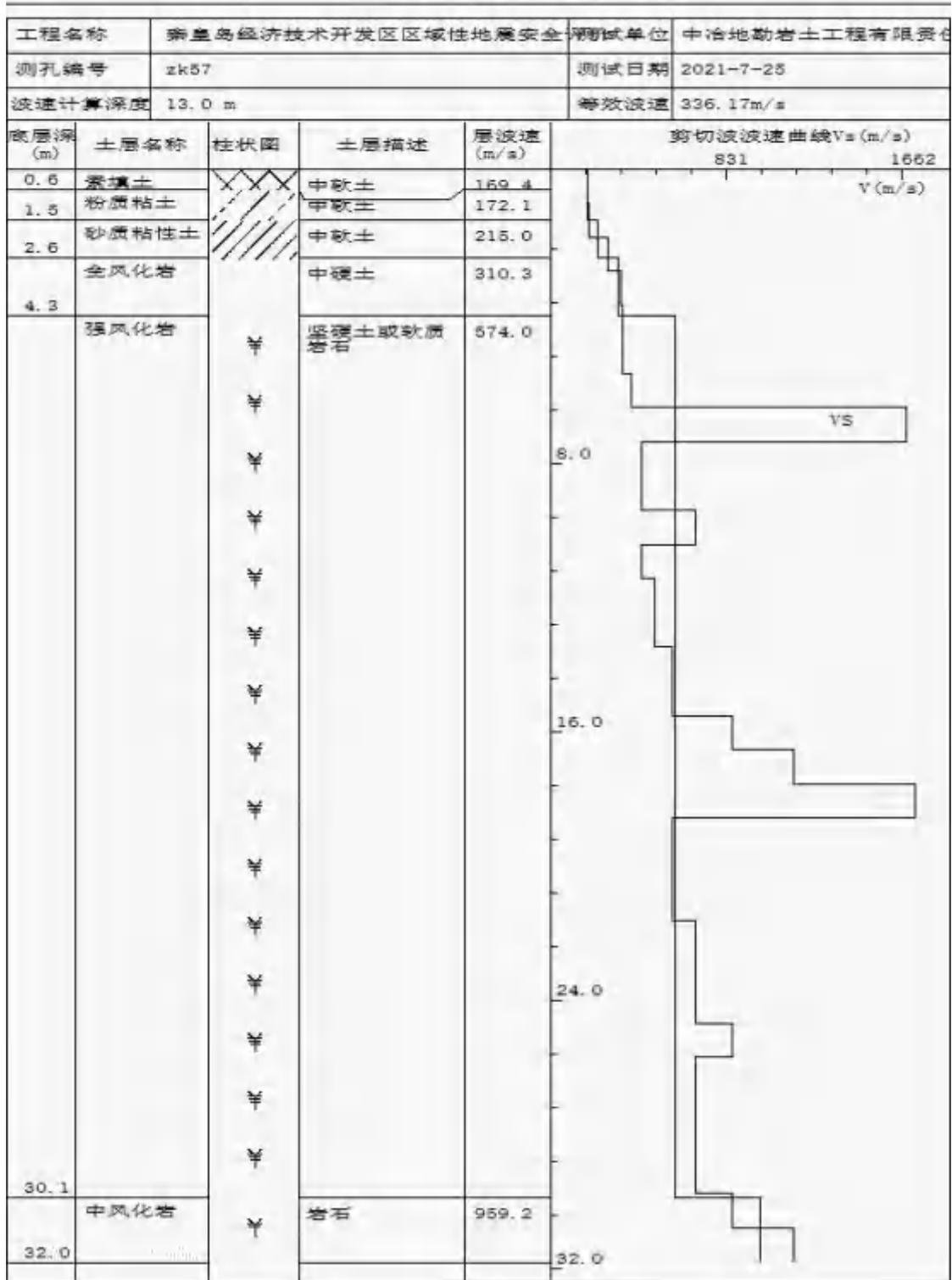


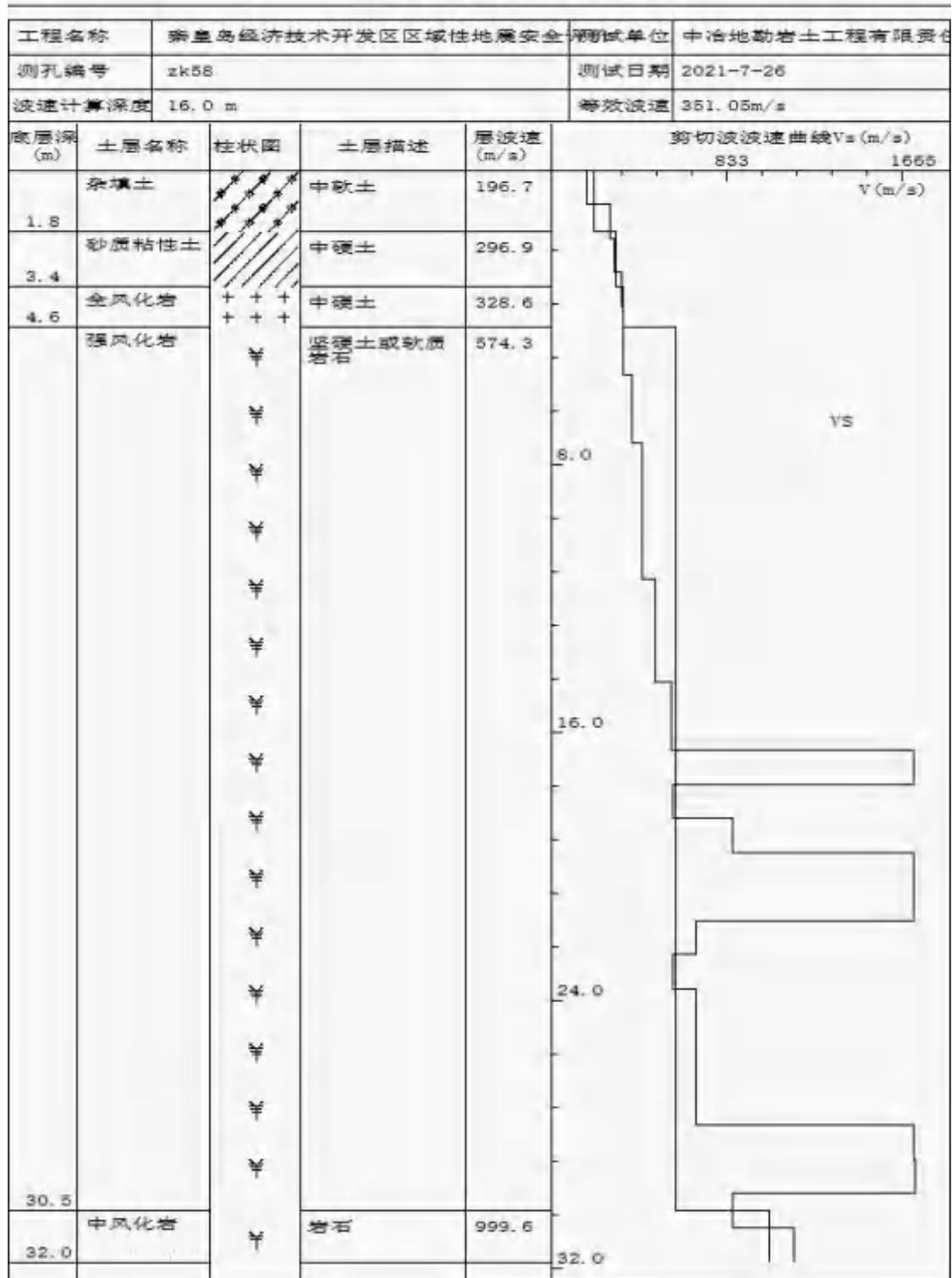
剪切波分析成果波速直方图



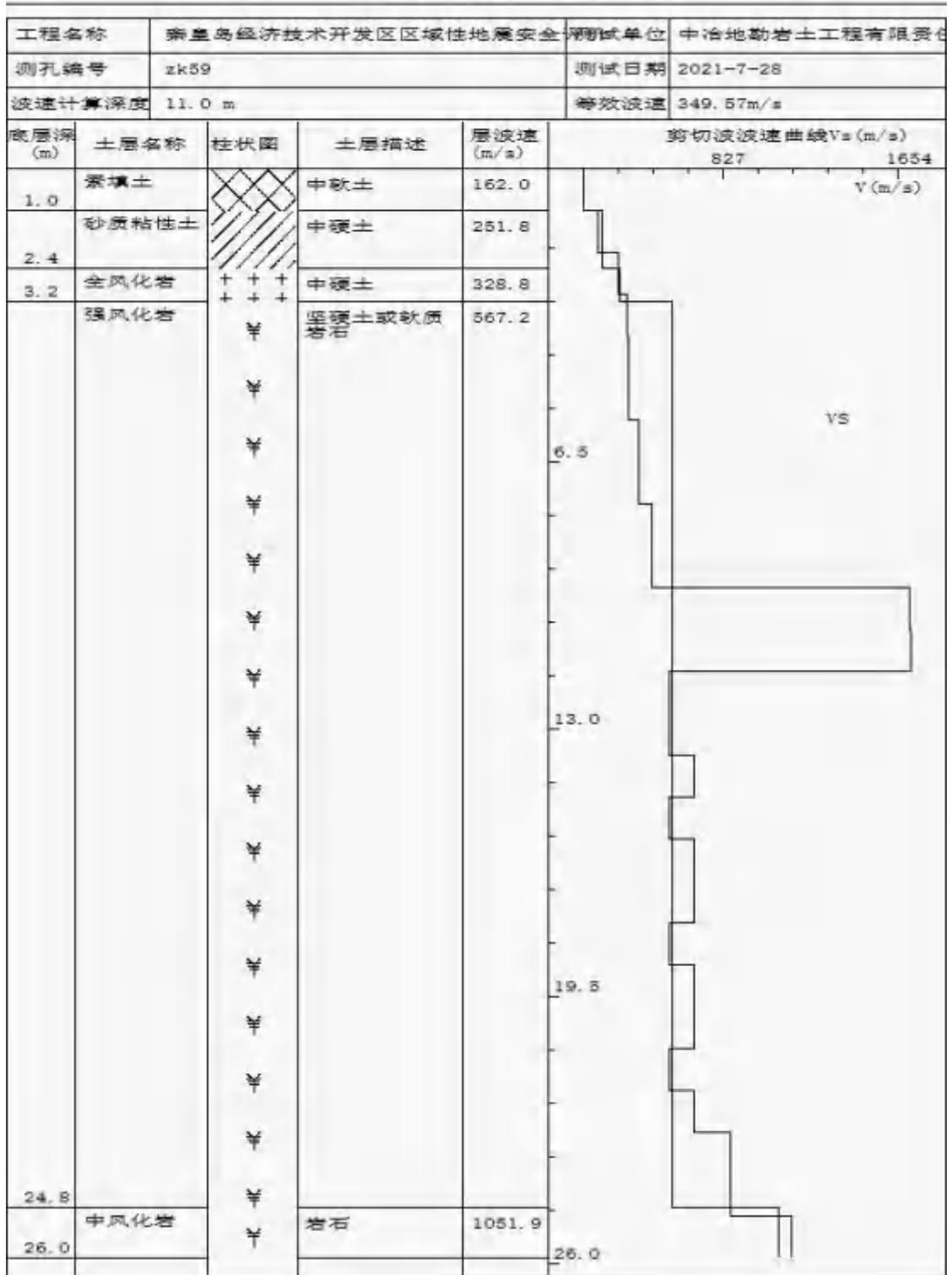
剪切波分析成果波速直方图



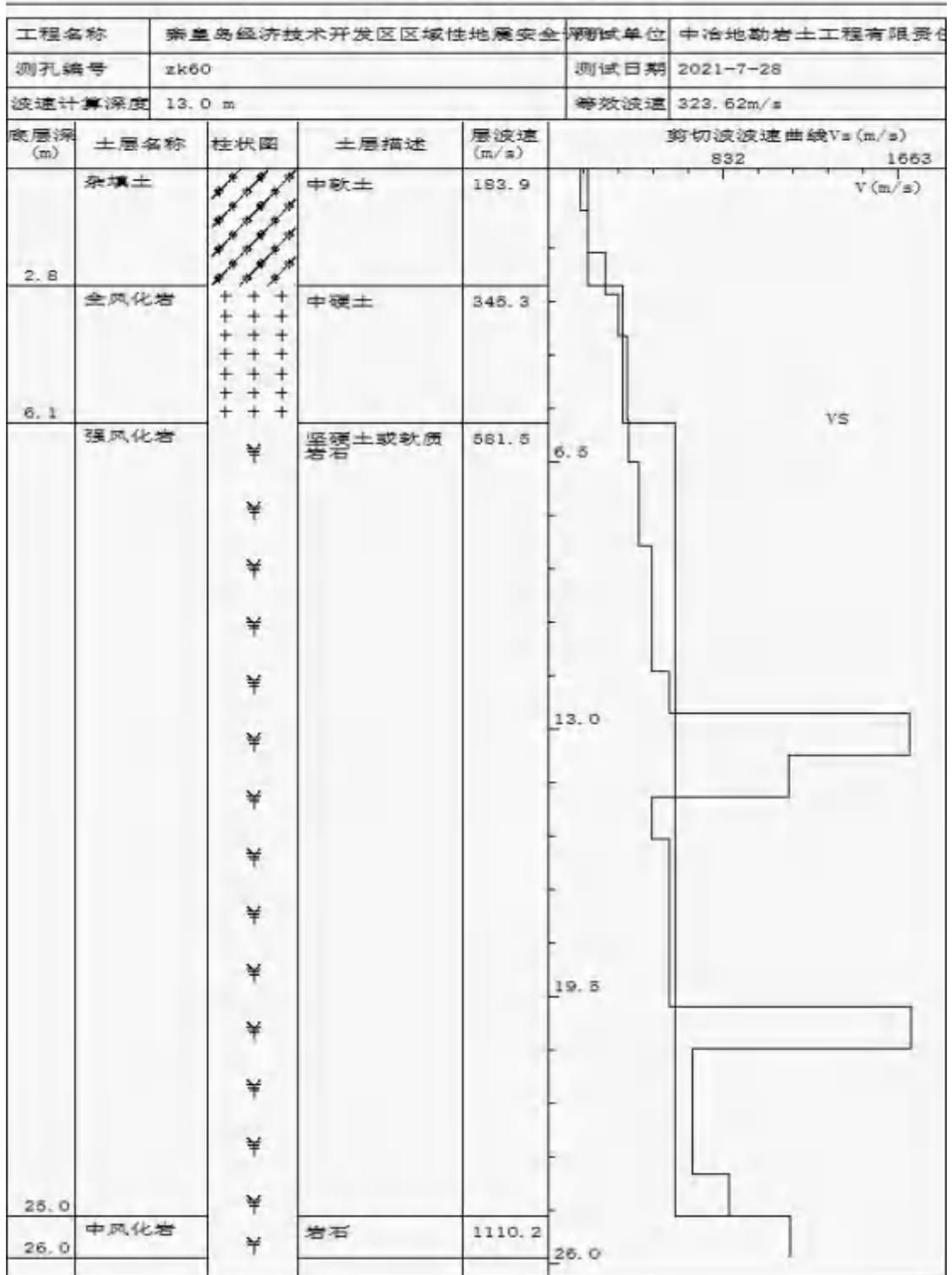
剪切波分析成果波速直方图



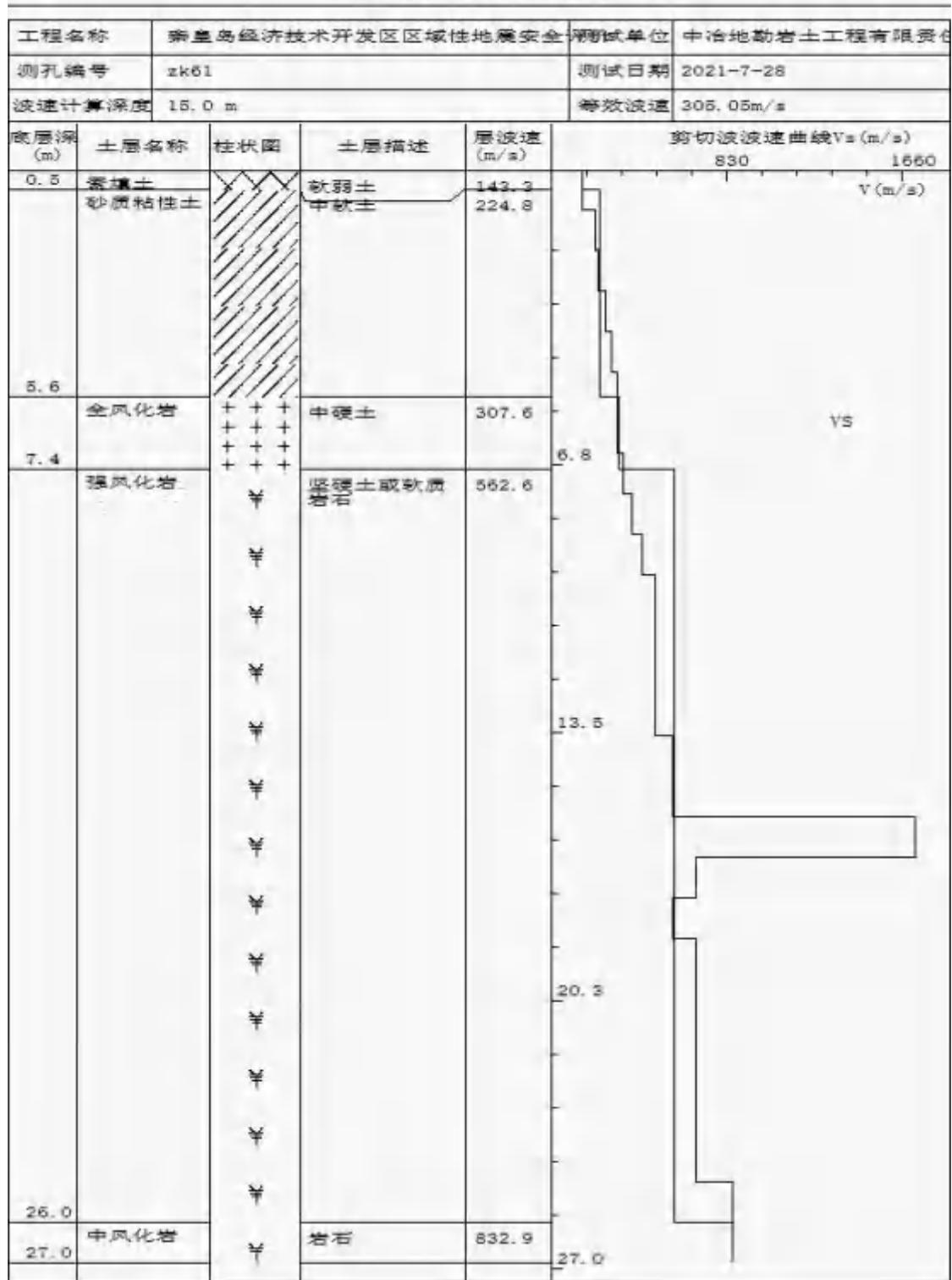
剪切波分析成果波速直方图



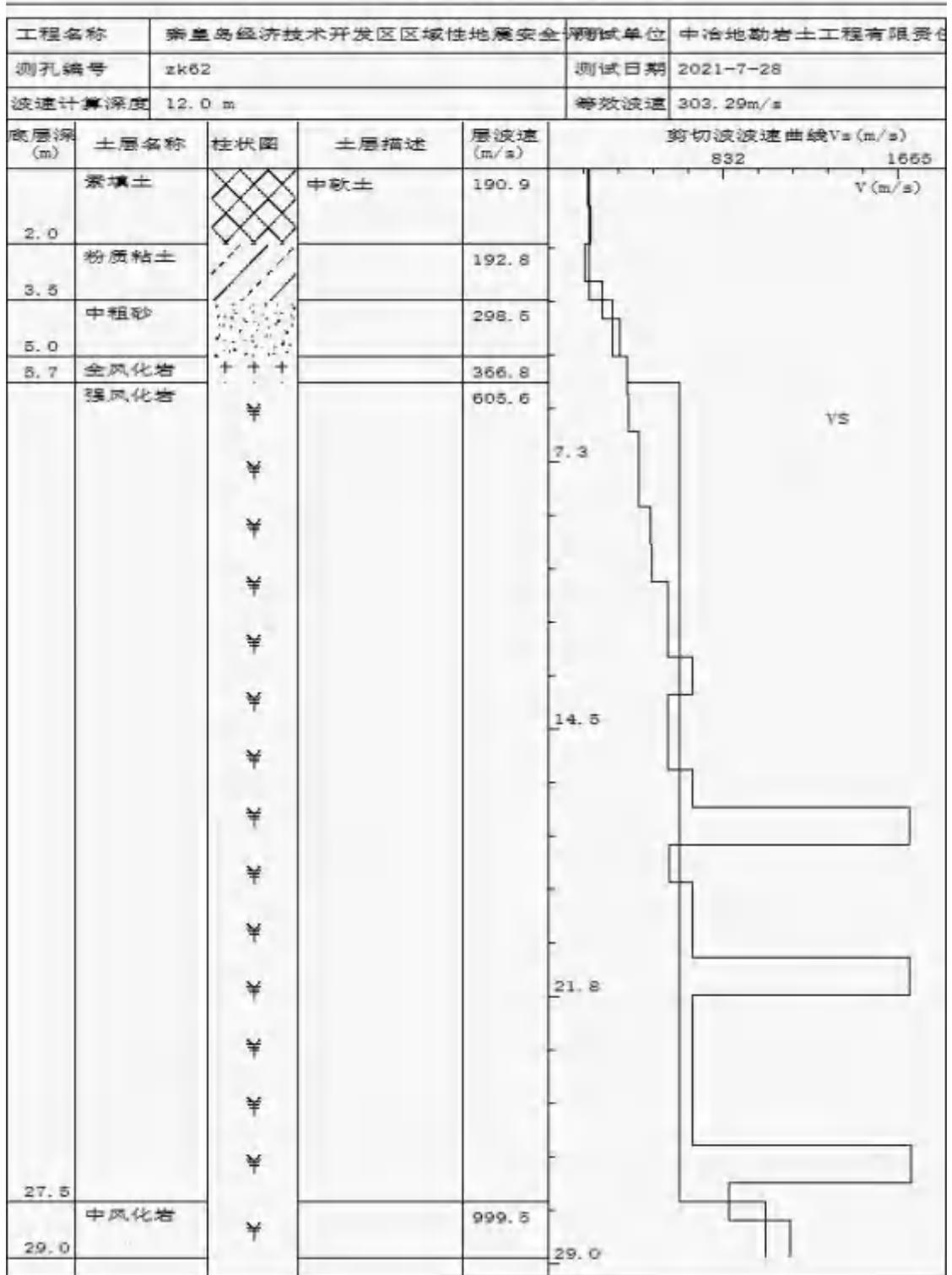
剪切波分析成果波速直方图



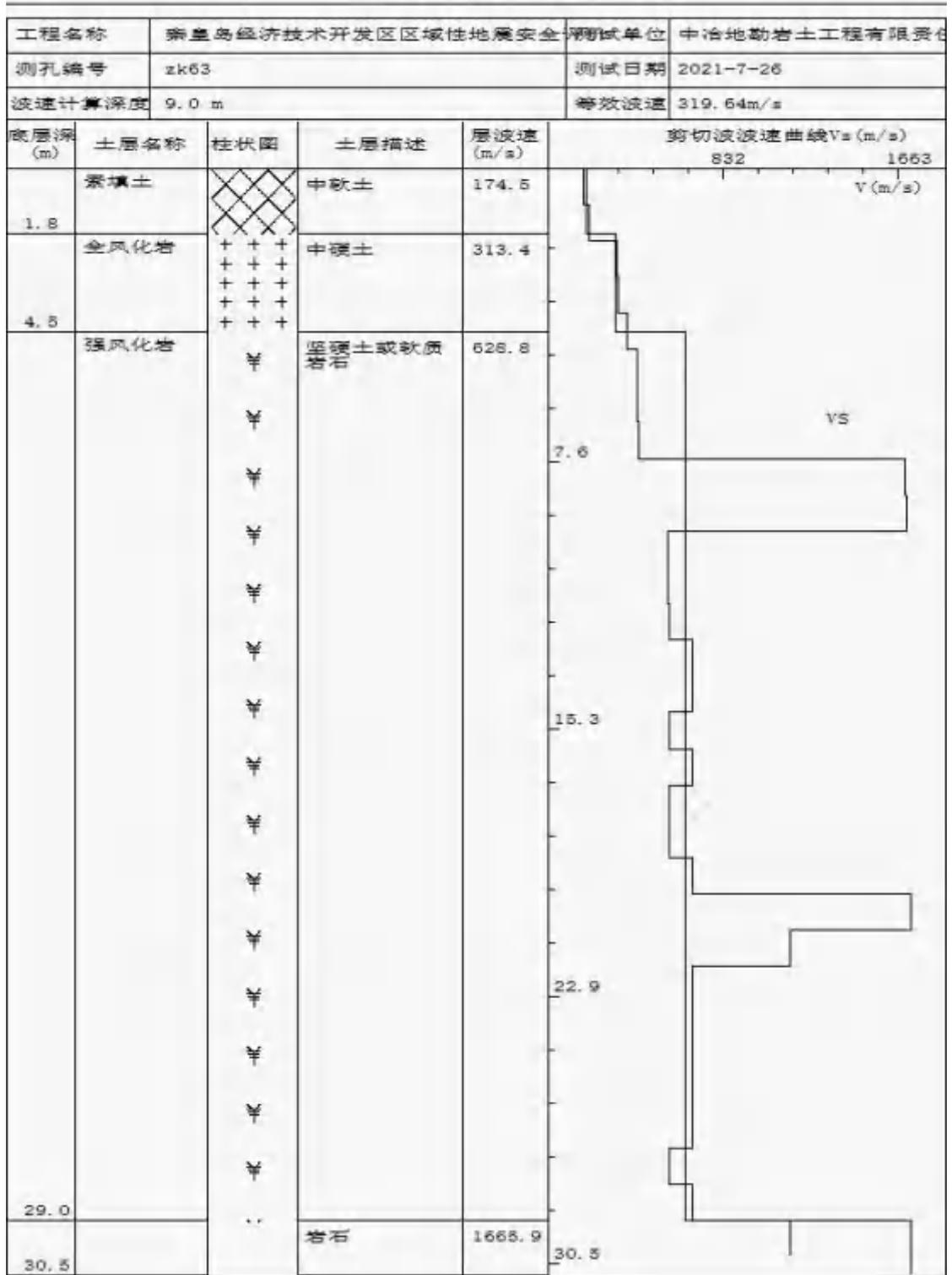
剪切波分析成果波速直方图



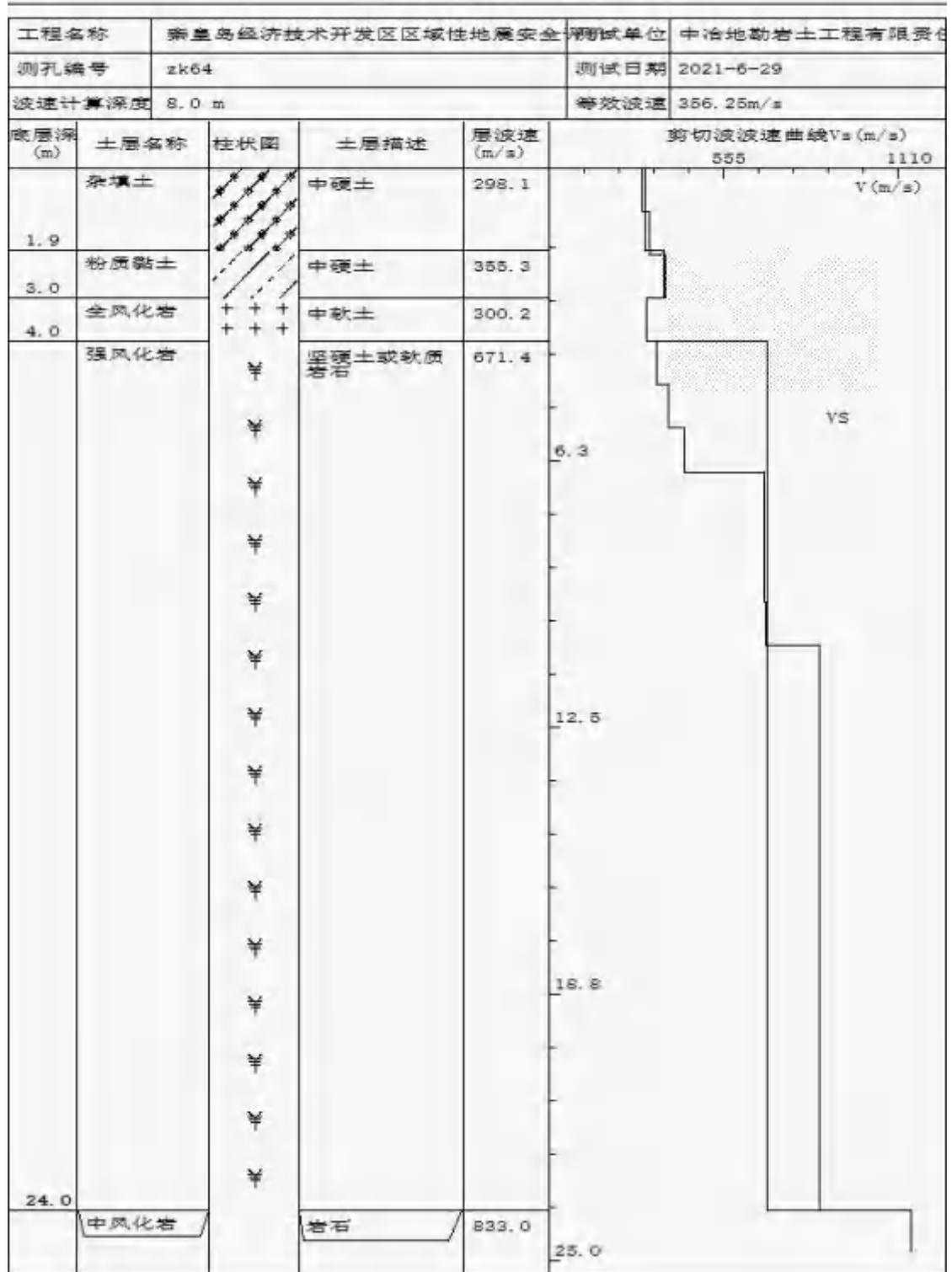
剪切波分析成果波速直方图



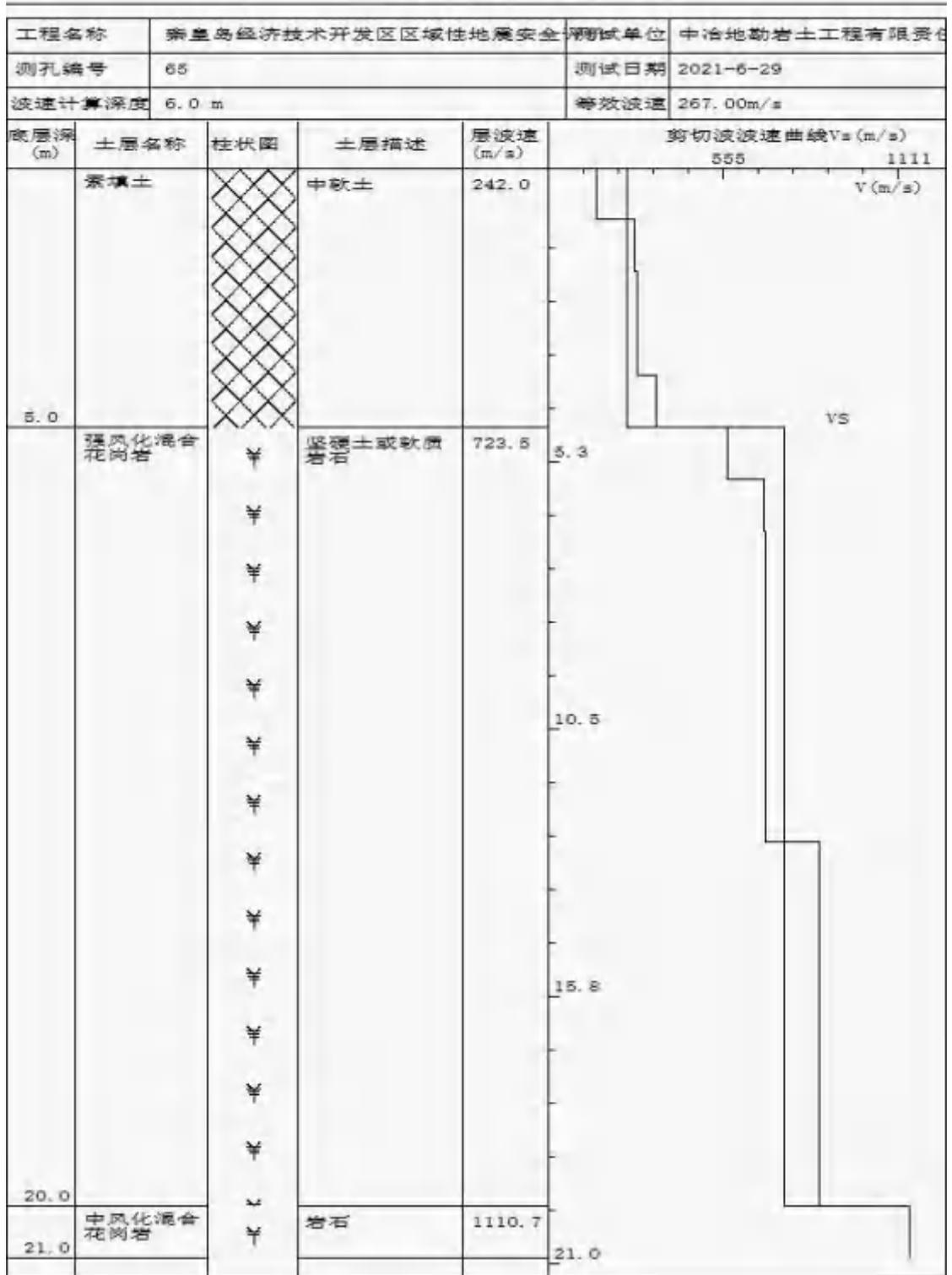
剪切波分析成果波速直方图



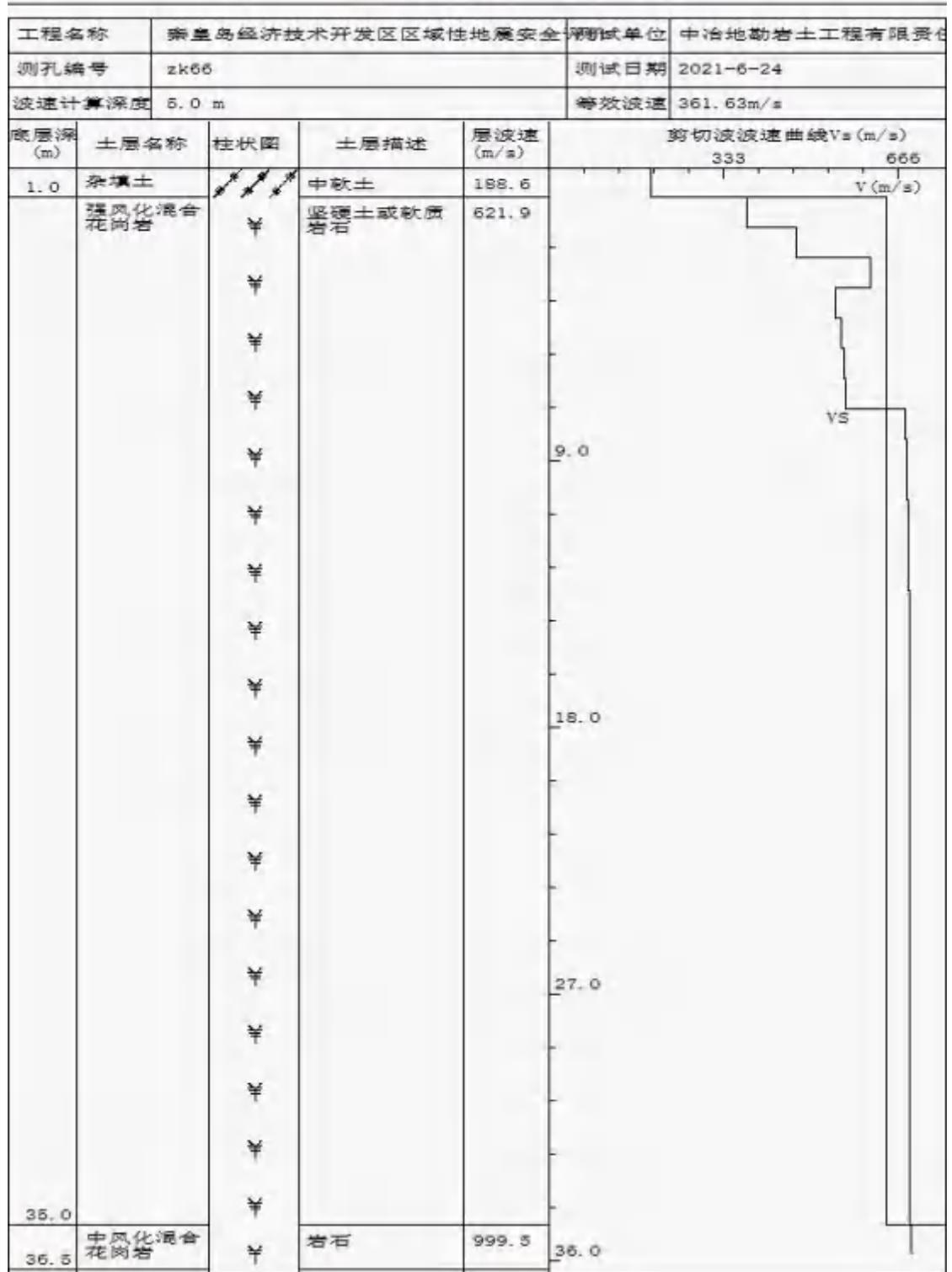
剪切波分析成果波速直方图



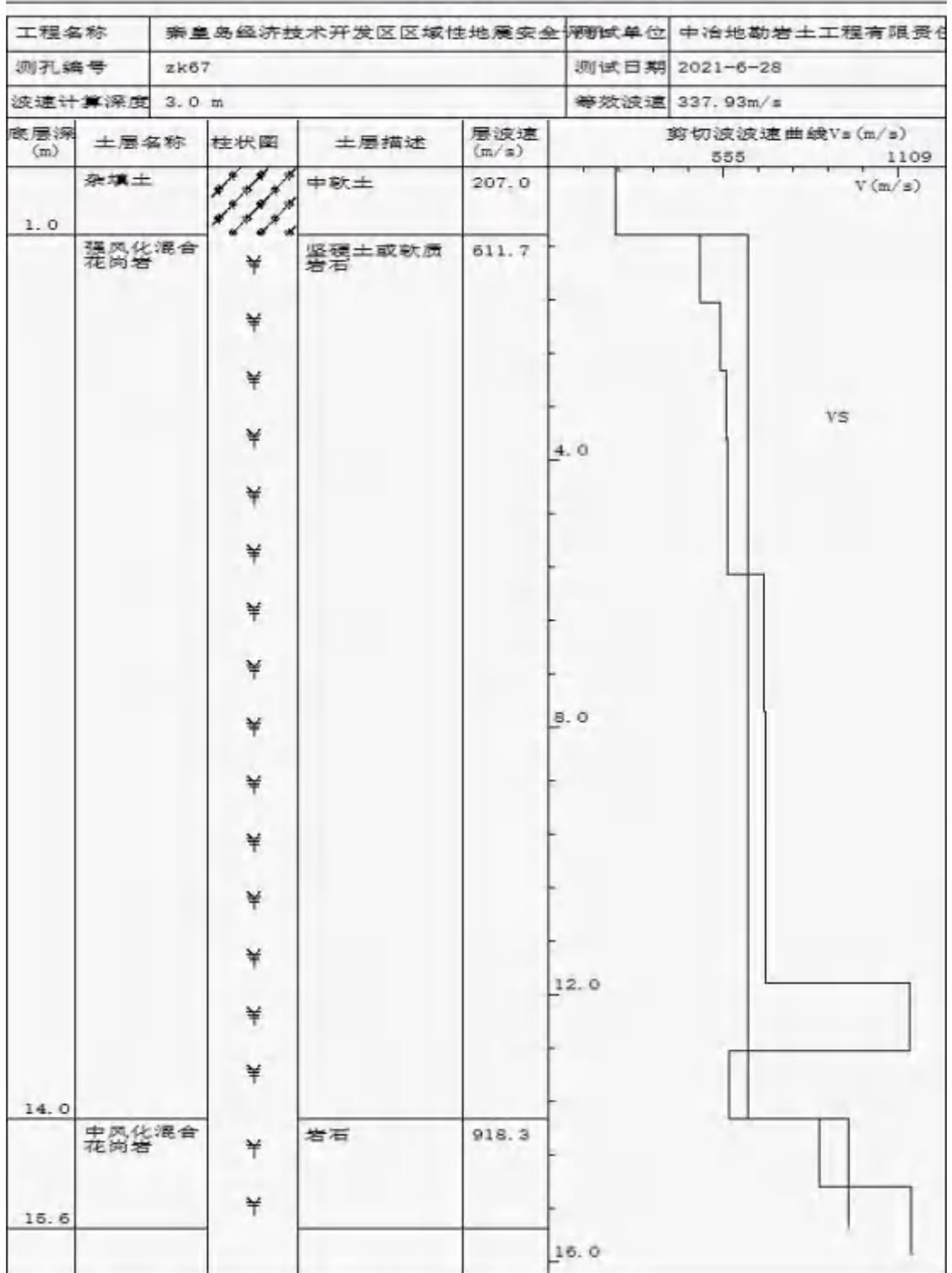
剪切波分析成果波速直方图



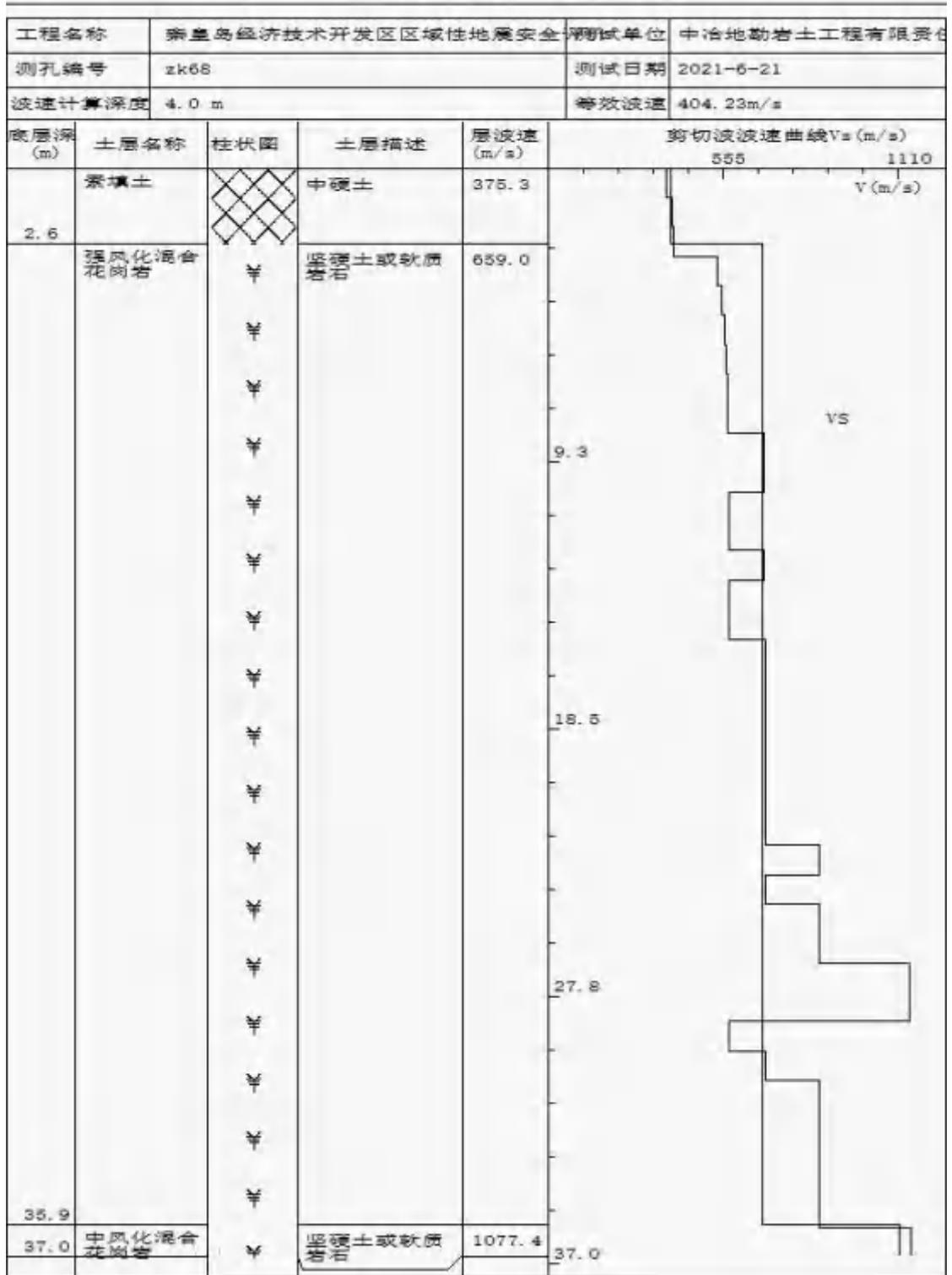
剪切波分析成果波速直方图



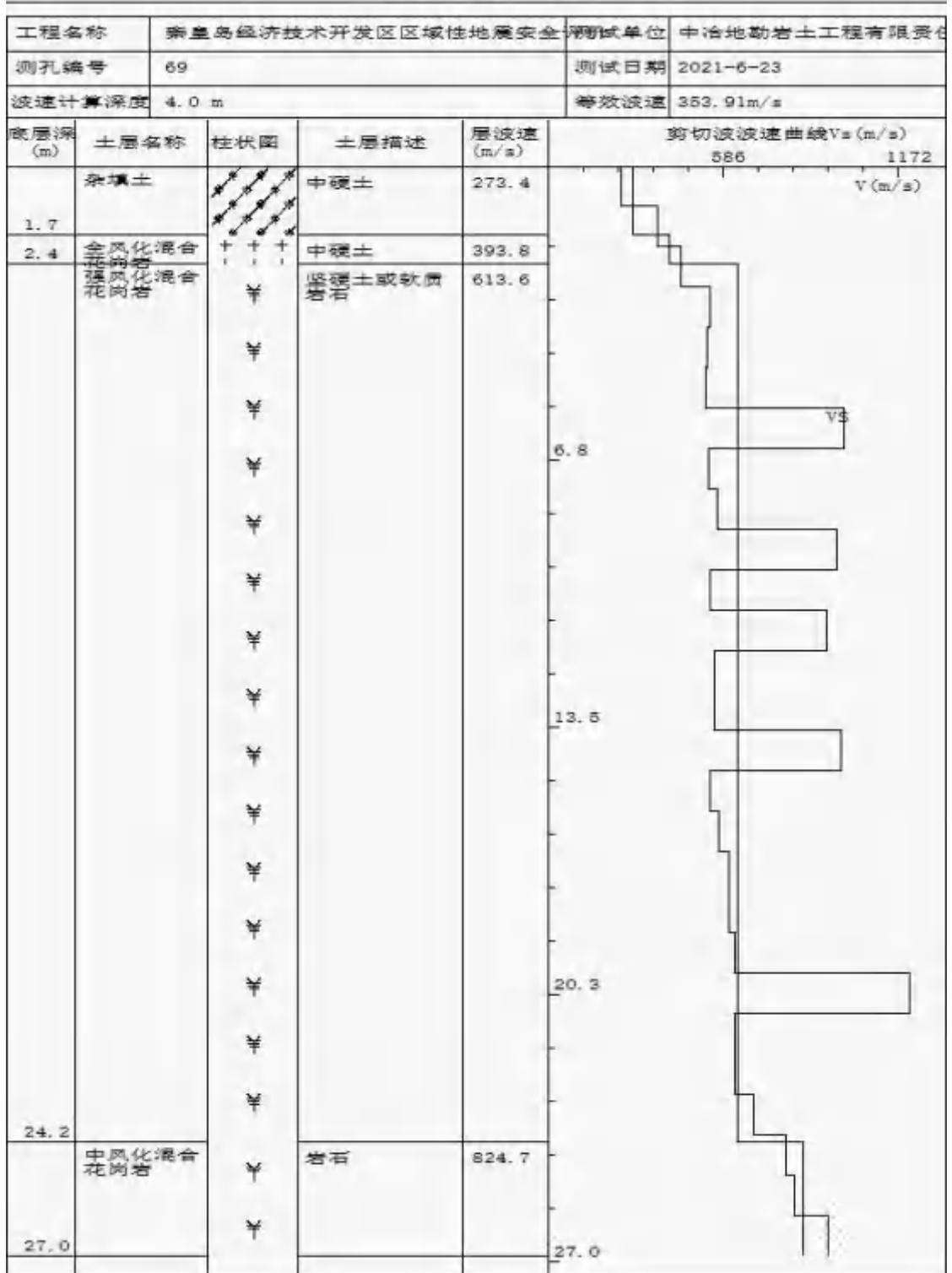
剪切波分析成果波速直方图



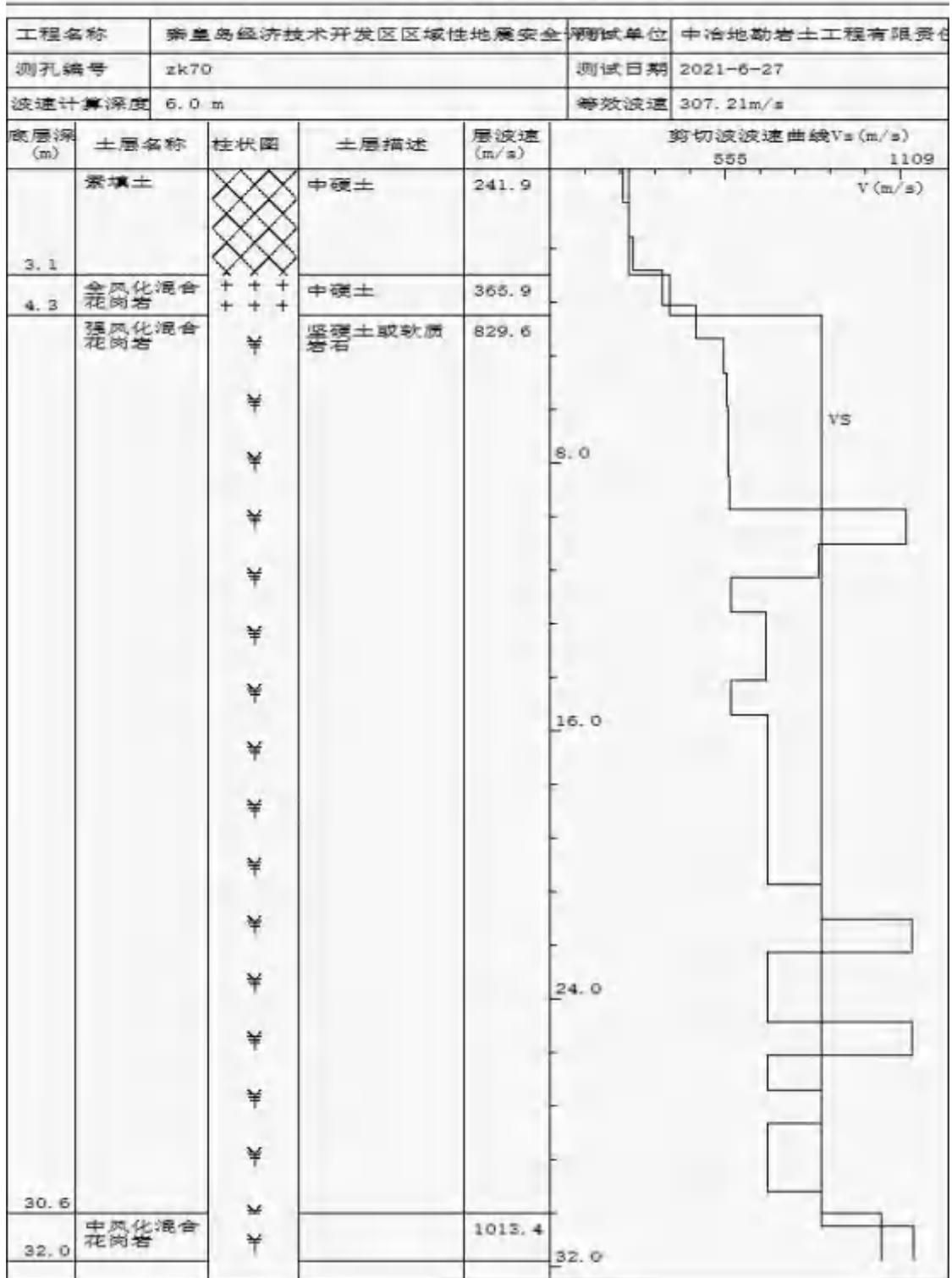
剪切波分析成果波速直方图



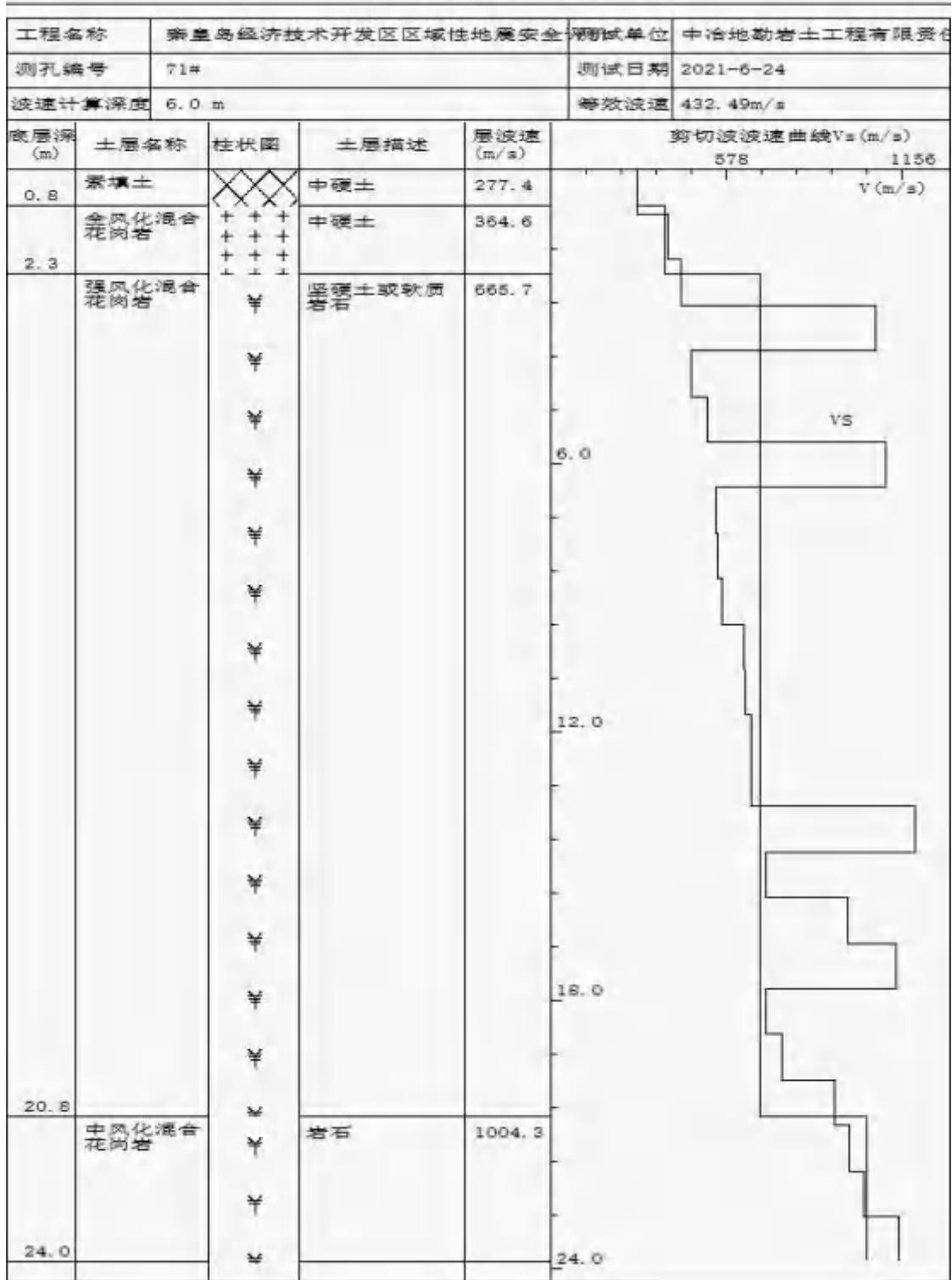
剪切波分析成果波速直方图



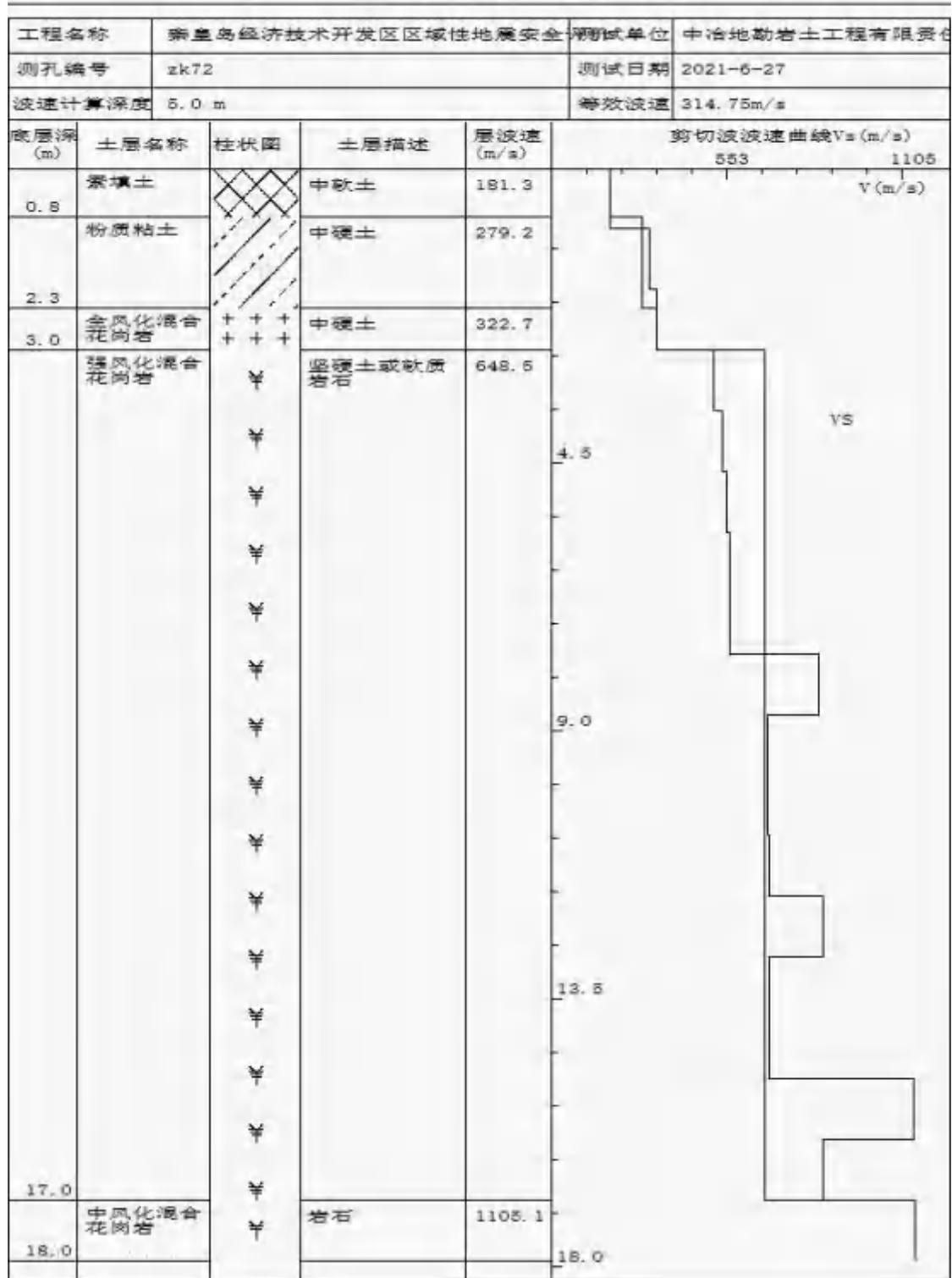
剪切波分析成果波速直方图



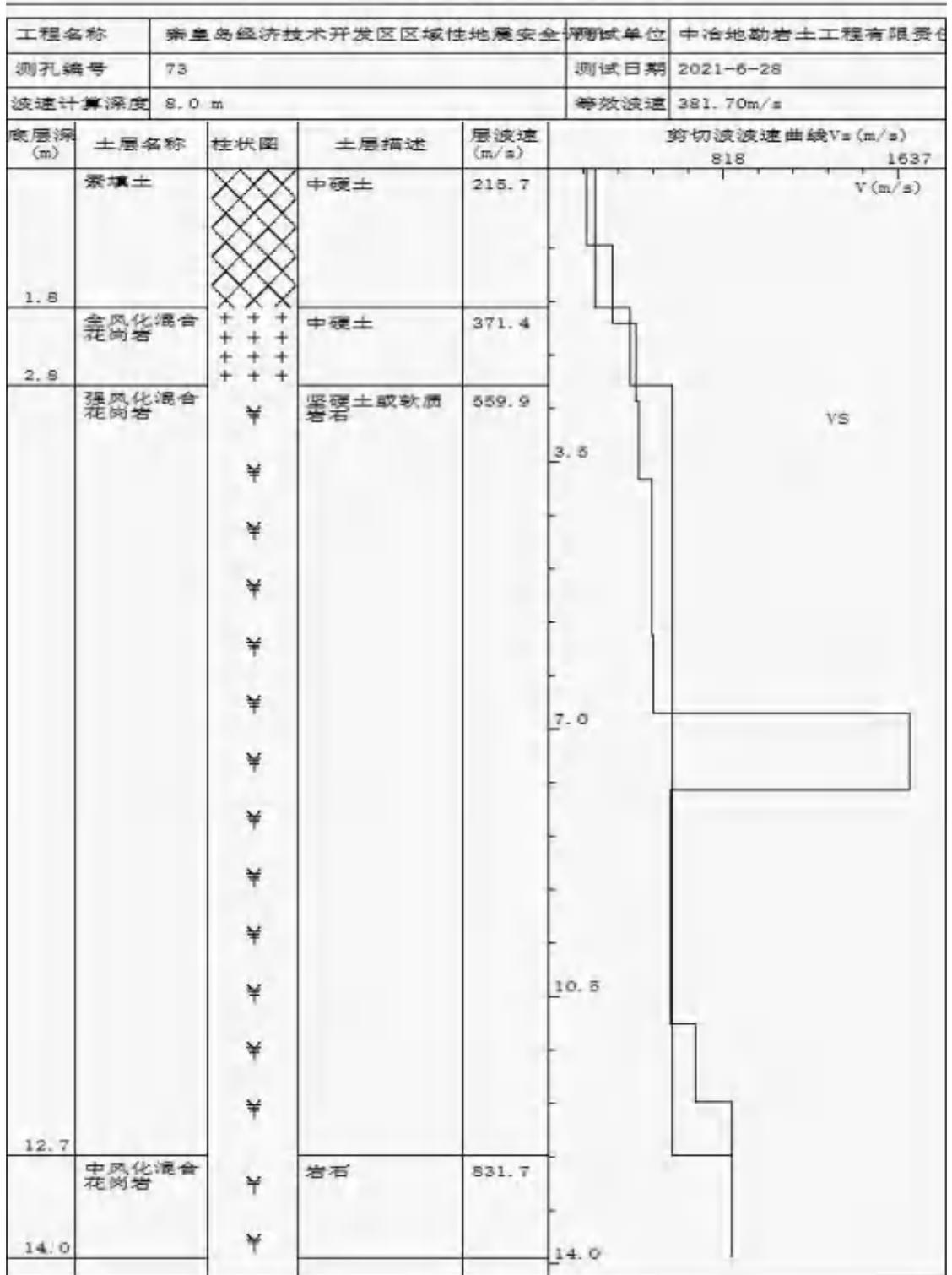
剪切波分析成果波速直方图



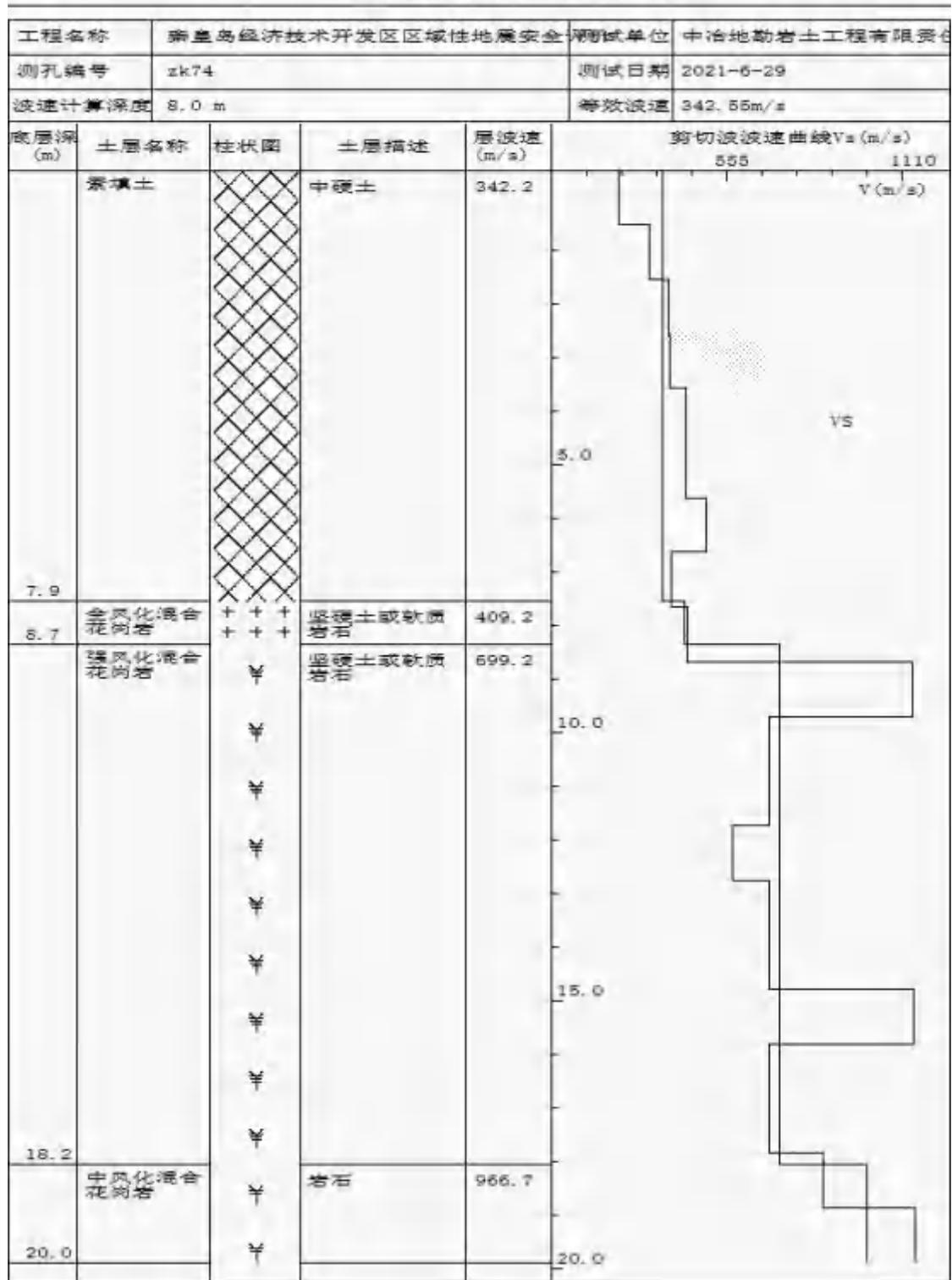
剪切波分析成果波速直方图



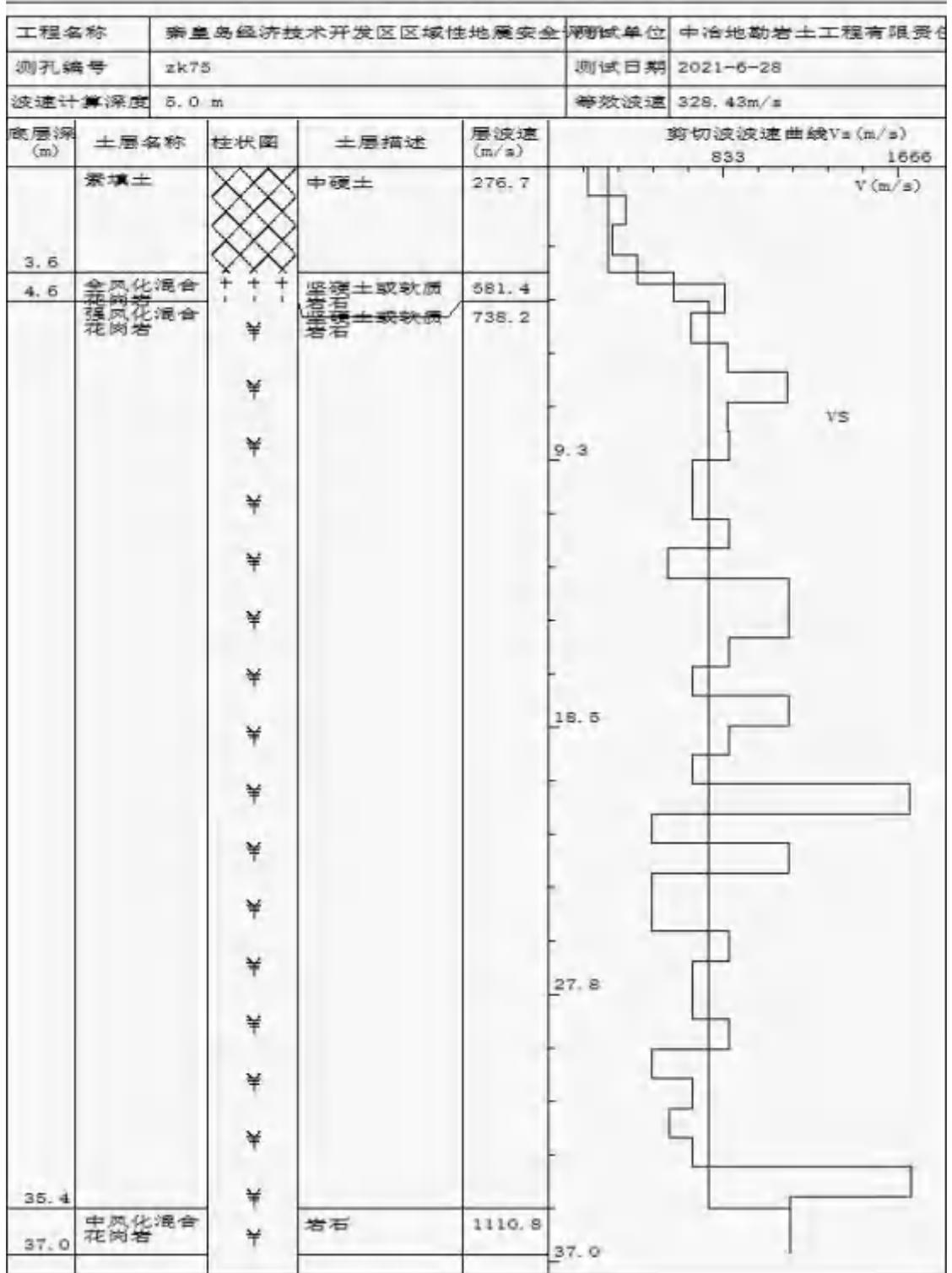
剪切波分析成果波速直方图



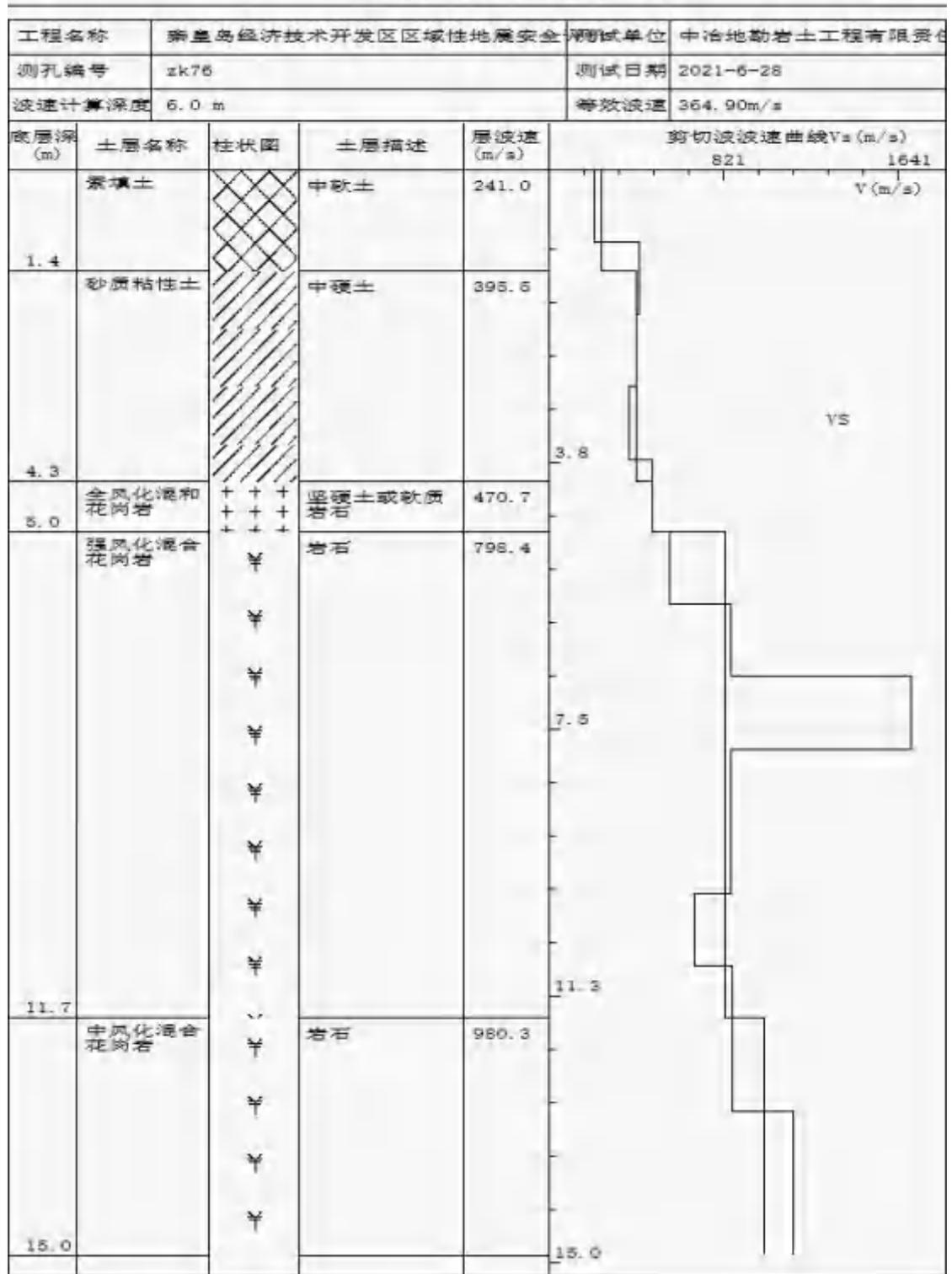
剪切波分析成果波速直方图



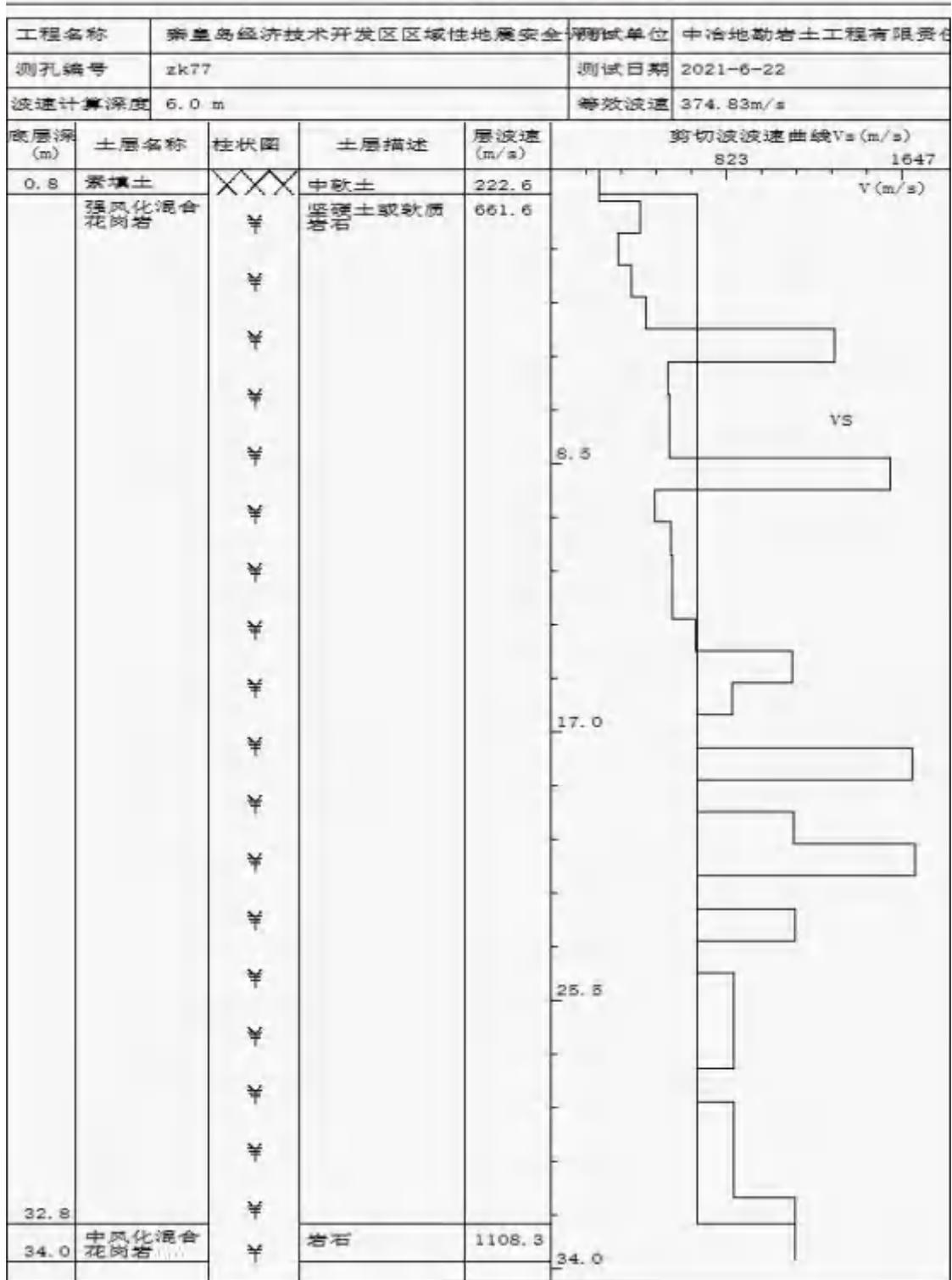
剪切波分析成果波速直方图



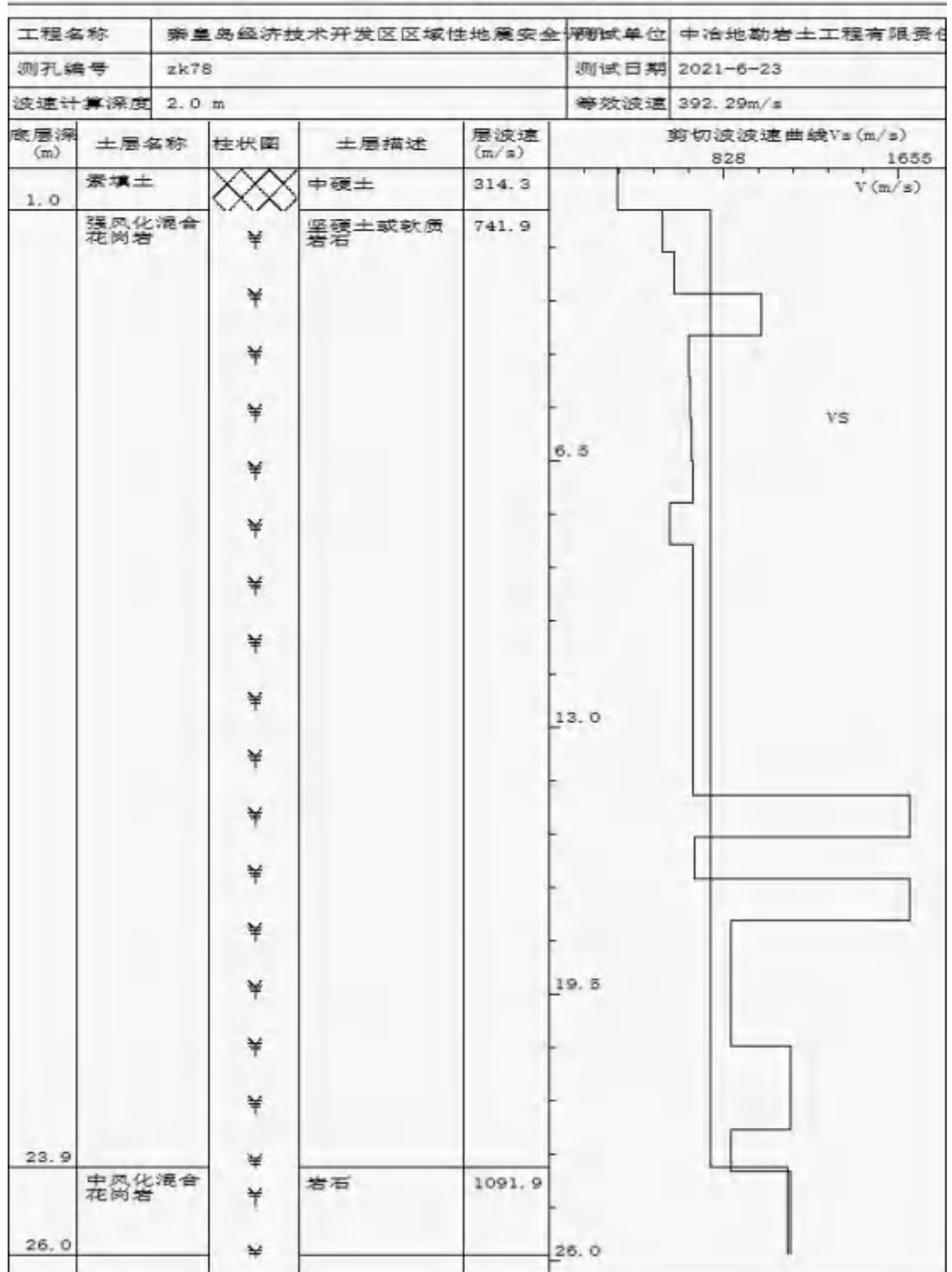
剪切波分析成果波速直方图



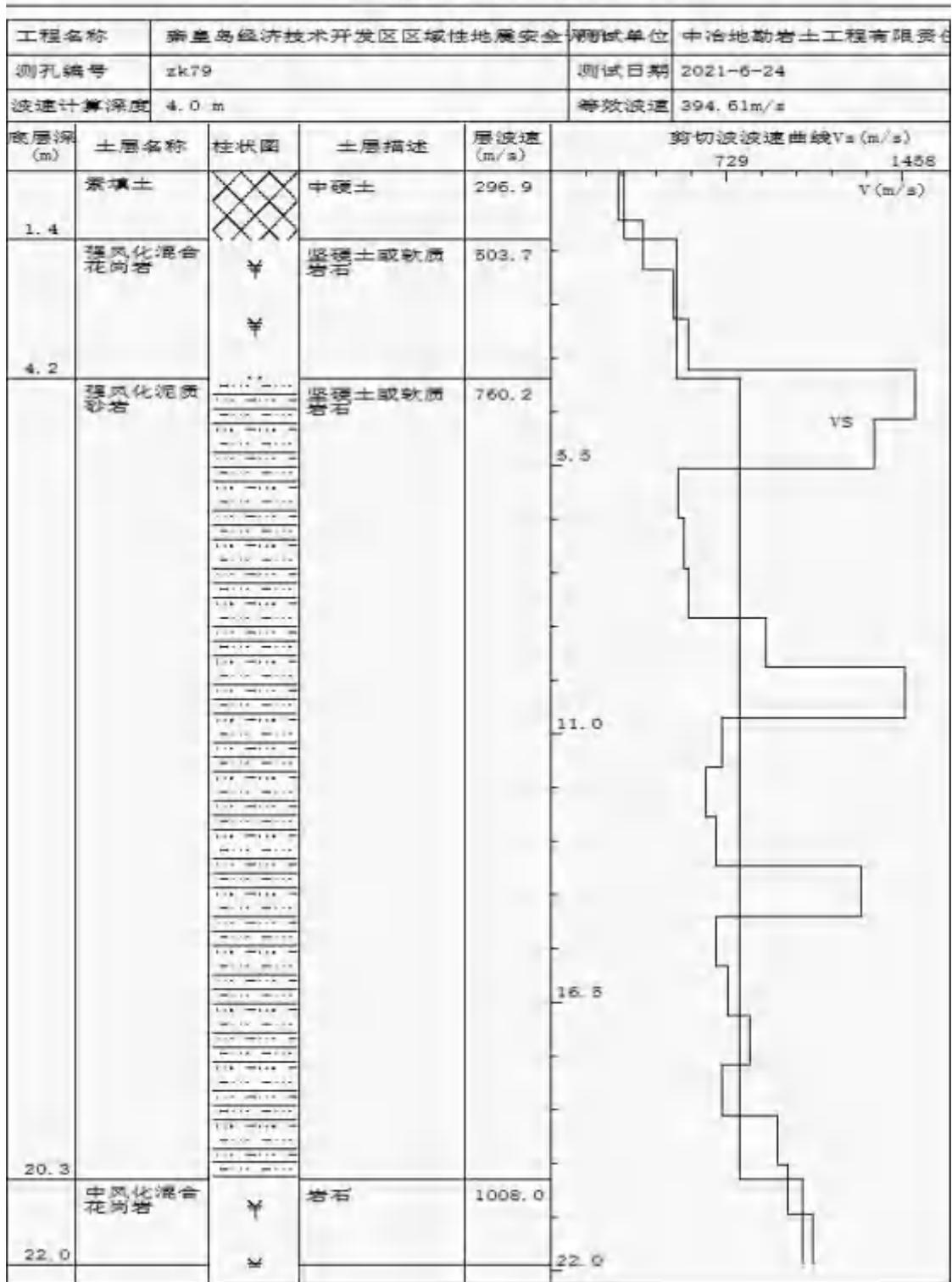
剪切波分析成果波速直方图



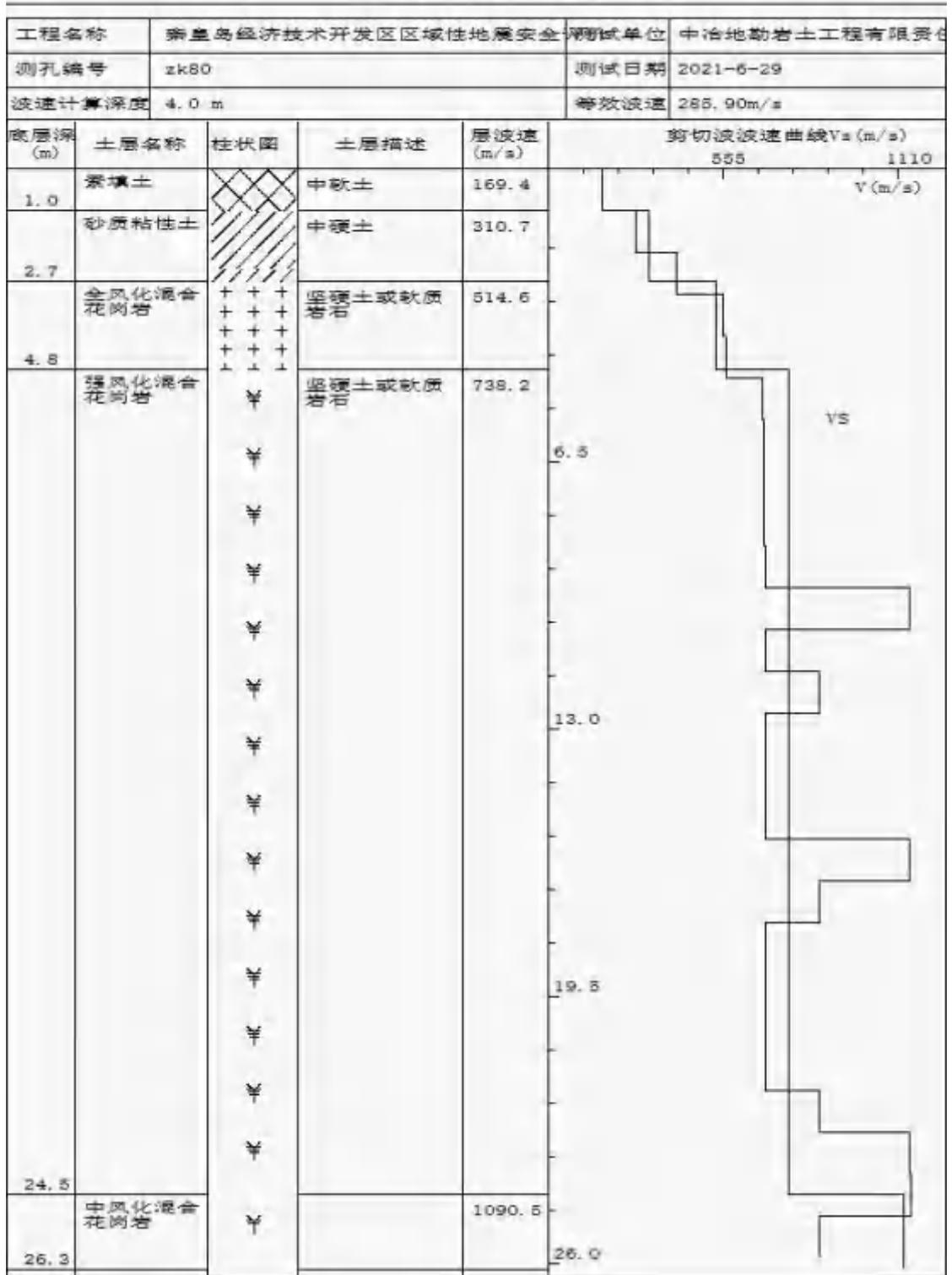
剪切波分析成果波速直方图



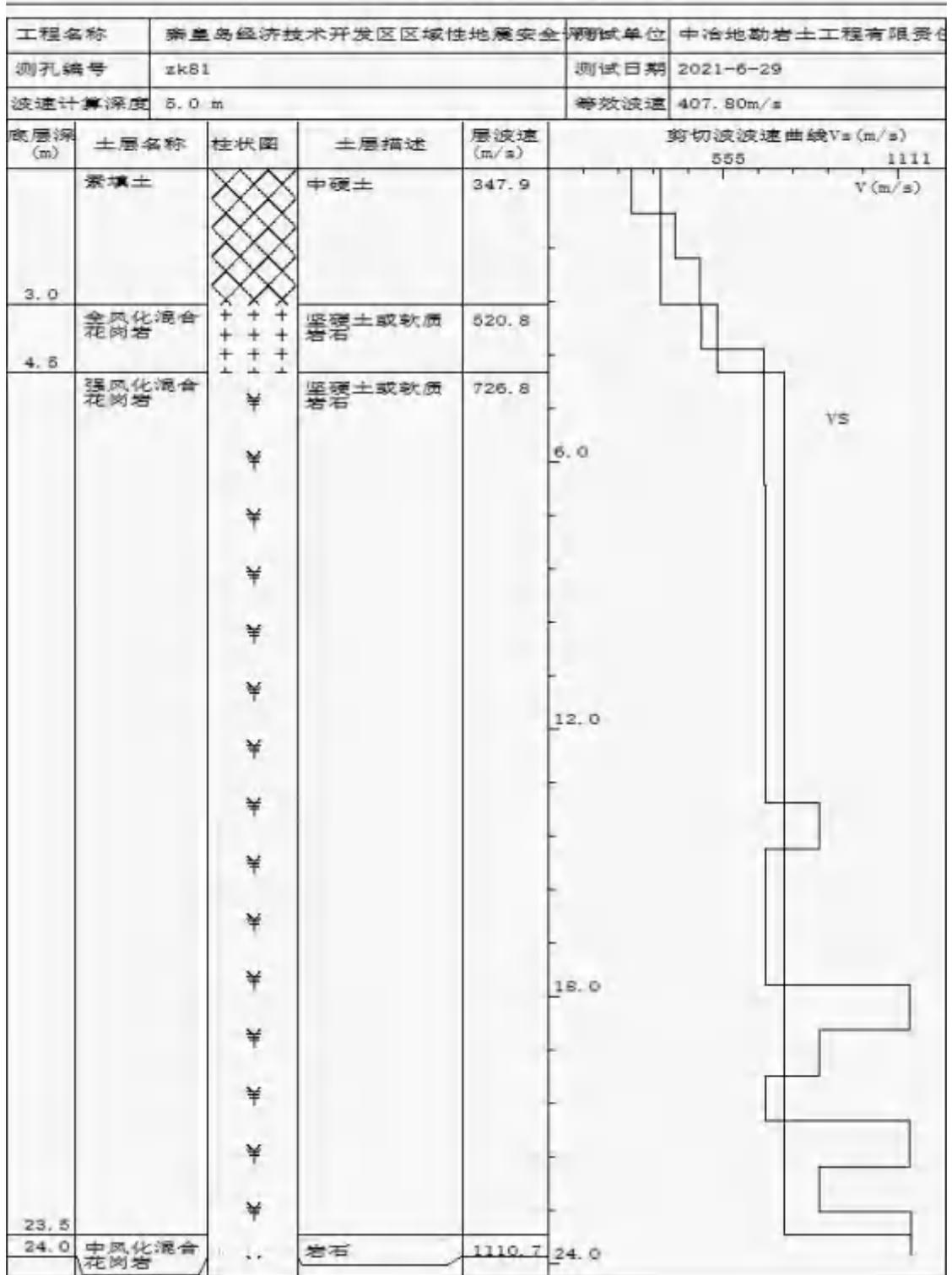
剪切波分析成果波速直方图



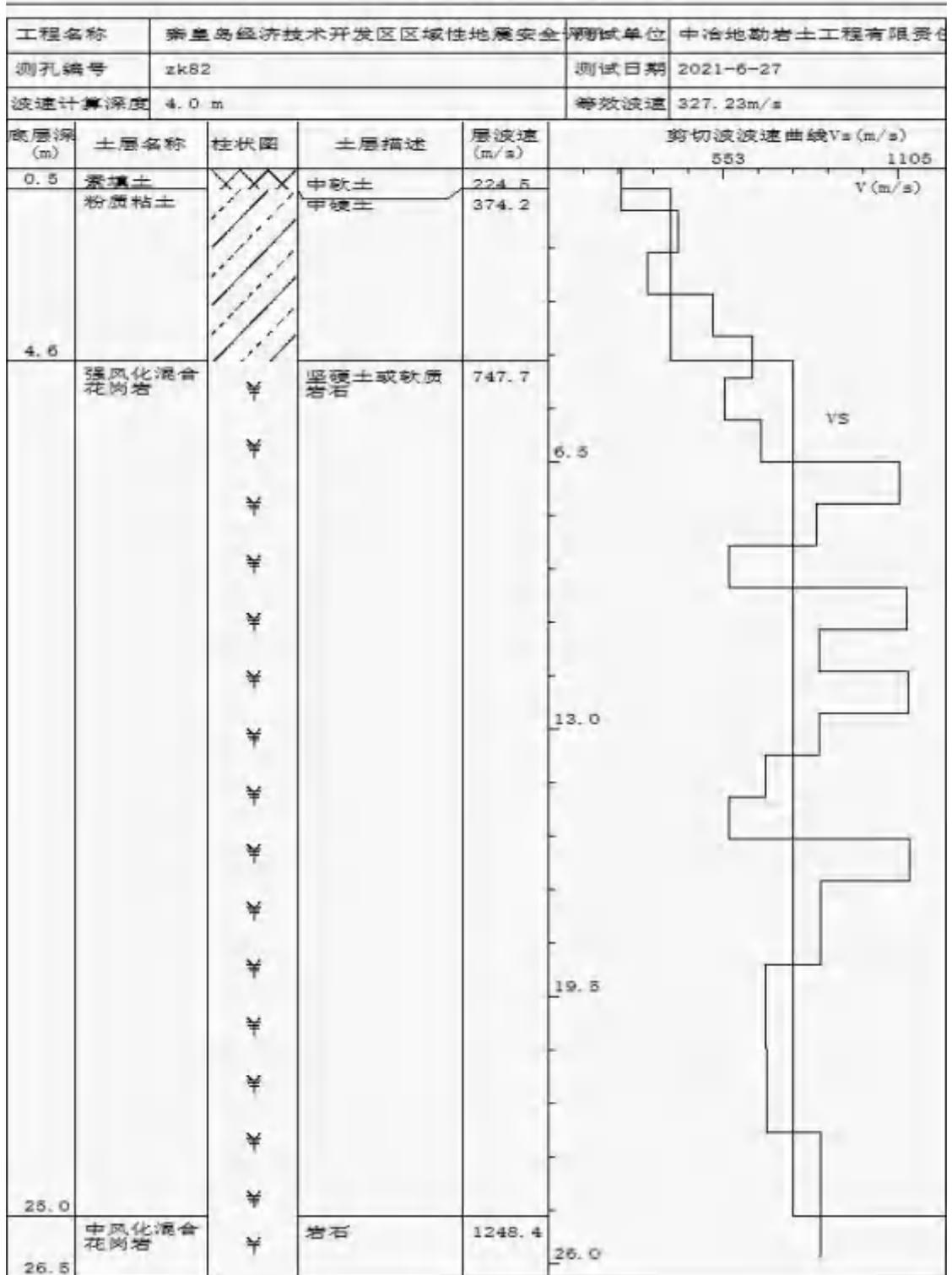
剪切波分析成果波速直方图



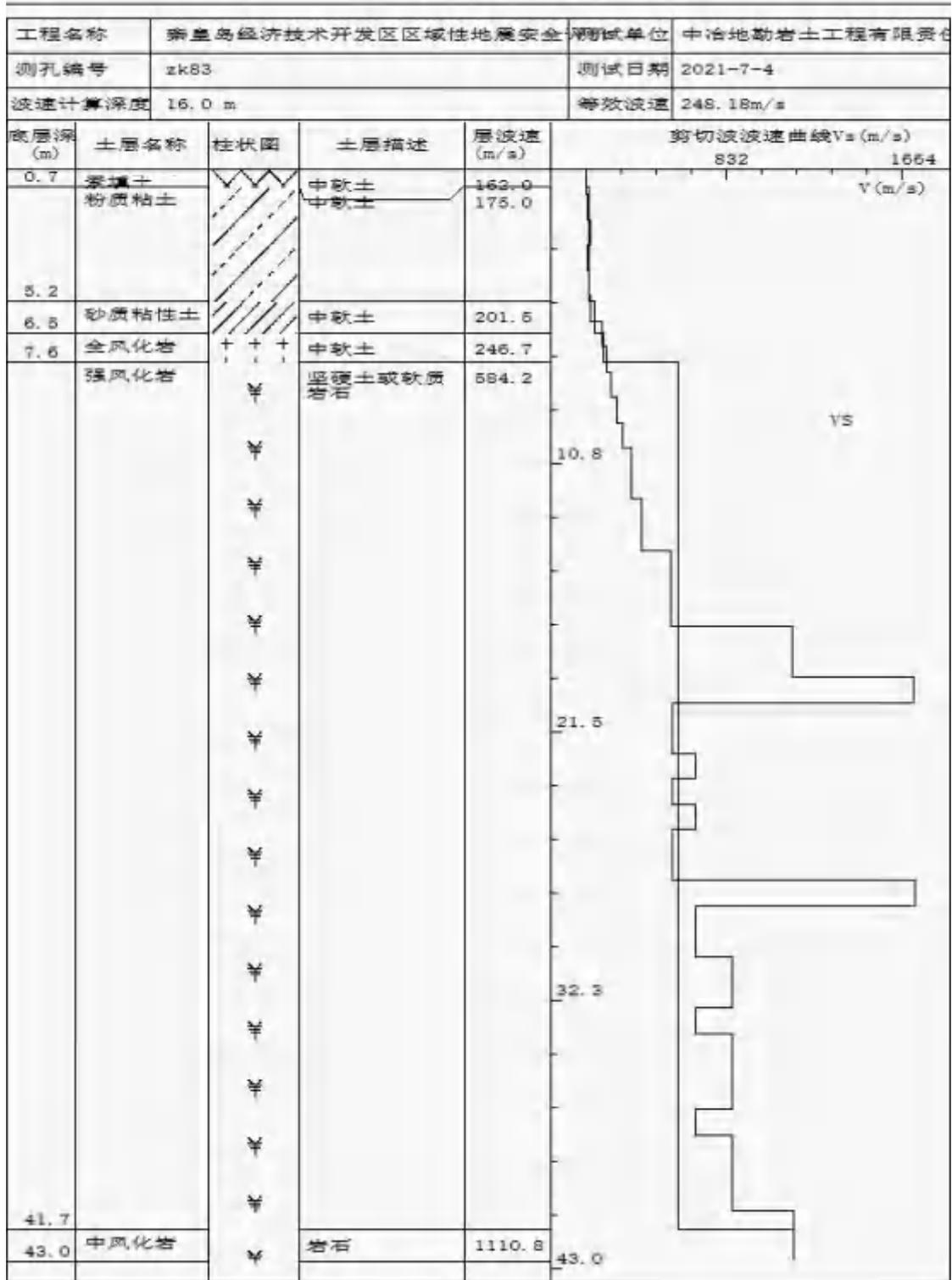
剪切波分析成果波速直方图



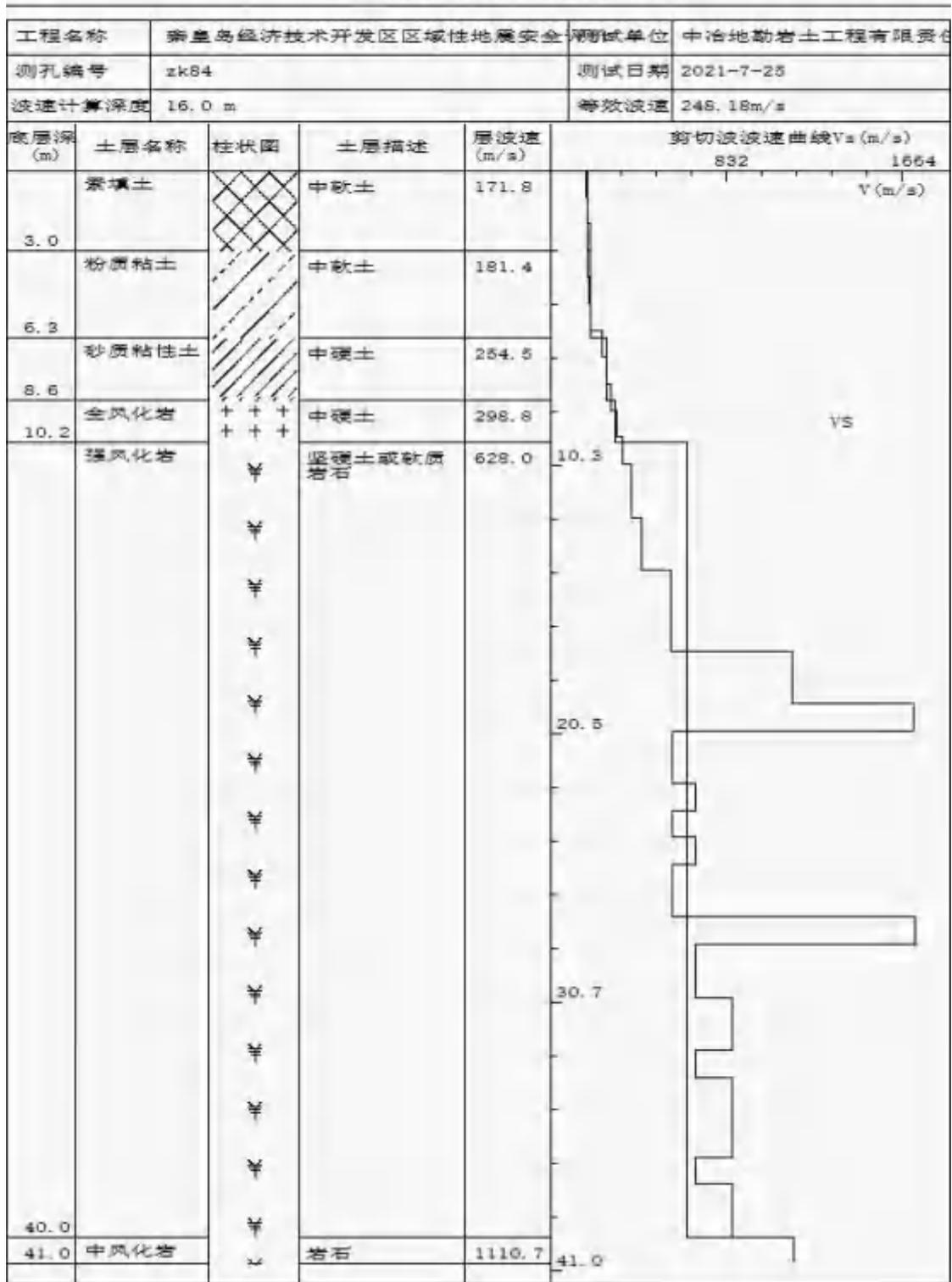
剪切波分析成果波速直方图



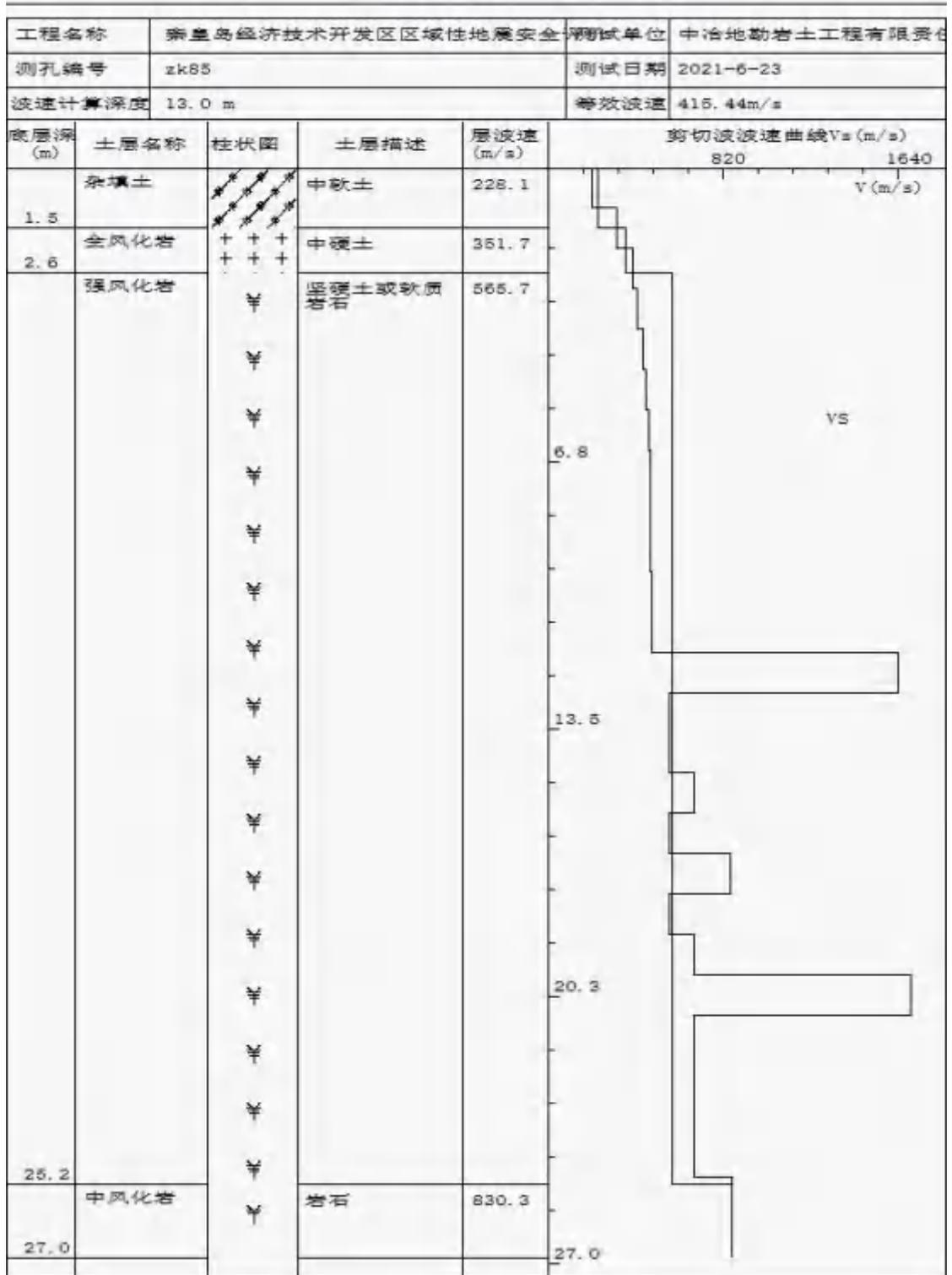
剪切波分析成果波速直方图



剪切波分析成果波速直方图



剪切波分析成果波速直方图



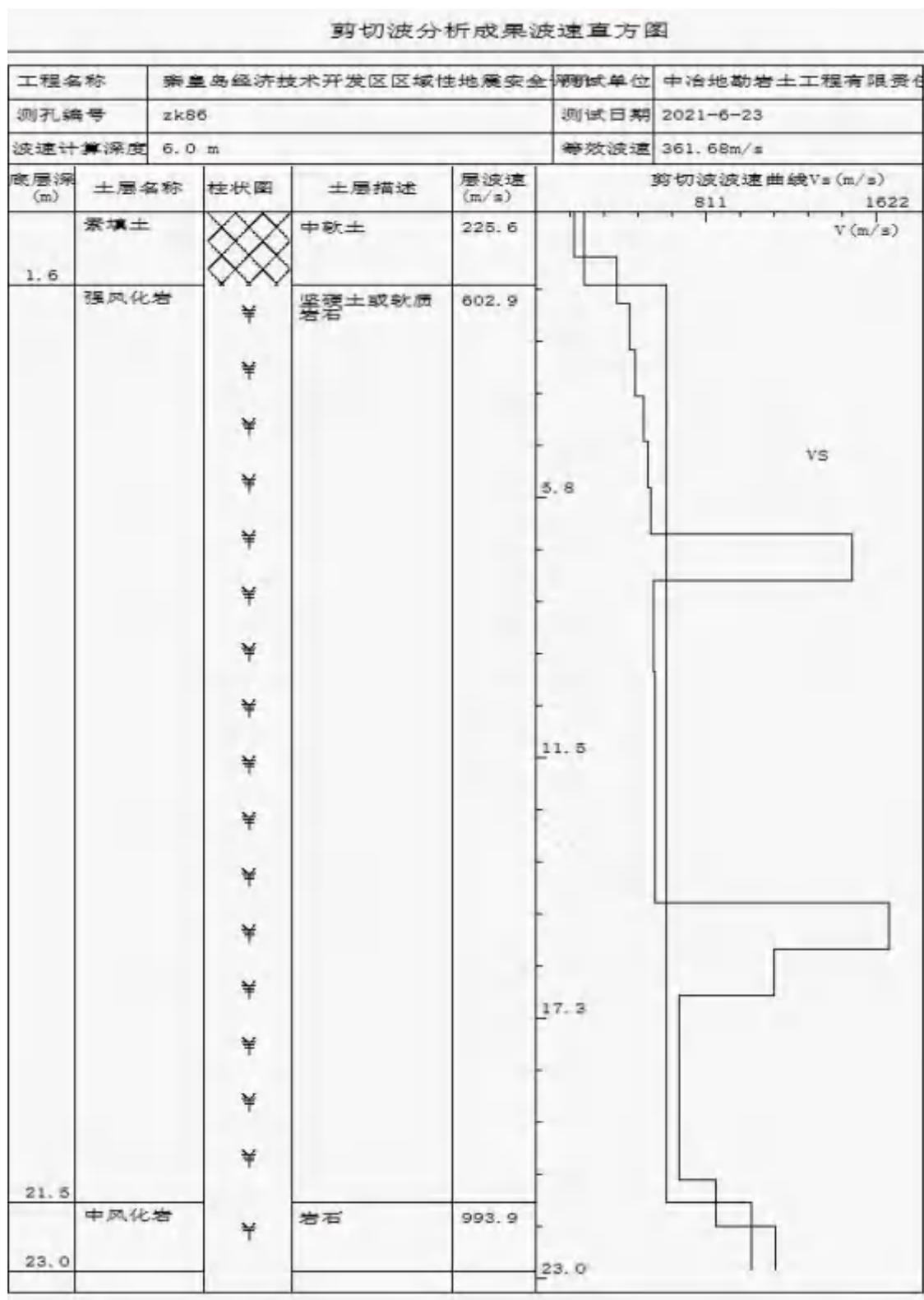


图 4.2.2 目标区钻孔剪切波速剖面图

#### 4.2.5 等效剪切波速计算和场地类别划分

根据《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010, 2016 局部修订版) 第 4.1.5 条, 土层的等效剪切波速应按下式计算:

$$v_{se} = d_0/t$$

$$t = \sum_{i=1}^n d_i/v_{si}$$

上式中： $v_{se}$ ——土层等效剪切波速；

$d_0$ ——计算深度（m），取覆盖层厚度和 20m 两者的较小值；

$t$ ——剪切波在地面至计算深度之间的传播时间；

$d_i$ ——计算深度范围内第 i 土层的厚度；

$v_{si}$ ——计算深度范围内第 i 土层的剪切波速；

$n$ ——计算深度范围内土层的分层数。

由上式可求得场地各孔的土层等效剪切波速(Vse)。

根据波速测试成果，本项目场地东区覆盖层厚度为 2-13 米，西区覆盖层厚度为 7-20 米。根据《建筑抗震设计规范》（GB50011-2010,2016 局部修订版）第 4.1.6 条，有关建筑物场地类别划分标准见表 4.2.2，目标区西区为 II 类场地、东区为 I<sub>1</sub> 和 II 类场地。判别结果见表 4.2.3，场地类别图 4.2.3。

表 4.2.2 各类建筑场地的覆盖层厚度（m）

岩石的剪切波速或土的等效剪切波速（m/s）	场地类别				
	I <sub>0</sub>	I <sub>1</sub>	II	III	IV
$V_s > 800$	0				
$800 \geq V_s > 500$		0			
$500 \geq V_{se} > 250$		<5	≥5		
$250 \geq V_{se} > 150$		<3	3~50	>50	
$V_{se} \leq 150$		<3	3~15	15~80	>80

表 4.2.3A 目标区(西区)场地建筑类别判别结果（50m）

孔号	等效剪切波速 Vse(m/s)	覆盖层厚度(m)	场地类别	孔号	等效剪切波速 Vse(m/s)	覆盖层厚度(m)	场地类别
zk1	326.13	9	II	zk34	273.38	15	II
zk2	334.18	7	II	zk35	248.00	11	II
zk3	296.55	12	II	zk36	320.28	12	II
zk4	341.43	9	II	zk37	287.77	17	II
zk5	331.03	13	II	zk38	277.98	13	II
zk6	213.40	11	II	zk39	315.91	18	II

zk7	333.75	10	II	zk40	304.79	17	II
zk8	438.03	13	II	zk41	333.62	12	II
zk9	343.03	11	II	zk42	248.65	17	II
zk10	264.91	17	II	zk43	281.80	18	II
zk11	236.48	20	II	zk44	400.22	15	II
zk12	241.81	19	II	zk45	424.51	14	II
zk13	246.08	20	II	zk46	226.18	12	II
zk14	226.27	19	II	zk47	211.82	12	II
zk15	264.63	20	II	zk48	375.00	10	II
zk16	234.47	18	II	zk49	392.50	12	II
zk17	253.60	13	II	zk50	303.25	13	II
zk18	286.88	16	II	zk51	341.43	9	II
zk19	233.48	14	II	zk52	351.18	12	II
zk20	255.24	15	II	zk53	333.62	12	II
zk21	339.66	9	II	zk54	293.69	14	II
zk22	296.00	11	II	zk55	326.06	13	II
zk23	303.41	10	II	zk56	289.10	13	II
zk24	490.81	10	II	zk57	336.17	13	II
zk25	321.97	11	II	zk58	351.05	16	II
zk26	402.56	14	II	zk59	349.57	11	II
zk27	383.88	16	II	zk60	323.62	13	II
zk28	264.06	11	II	zk61	305.05	15	II
zk29	290.22	10	II	zk62	303.29	12	II
zk30	249.23	13	II	zk63	319.64	9	II
zk31	321.97	11	II	zk83	248.18	16	II
zk32	256.63	12	II	zk84	248.18	16	II
zk33	279.37	16	II				

表 4.2.3B 目标区(东区)场地建筑类别判别结果

孔号	等效剪切波速 Vse(m/s)	覆盖层厚度(m)	场地类别	孔号	等效剪切波速 Vse(m/s)	覆盖层厚度(m)	场地类别
zk64	365.25	8	II	zk75	328.43	5	II
zk65	267.00	6	II	zk76	364.90	6	II
zk66	361.63	5	II	zk77	374.83	6	II

zk67	337.93	3	I <sub>1</sub>	zk78	392.29	2	I <sub>1</sub>
zk68	404.23	4	I <sub>1</sub>	zk79	394.61	4	I <sub>1</sub>
zk69	353.91	4	I <sub>1</sub>	zk80	285.90	4	I <sub>1</sub>
zk70	307.21	6	II	zk81	407.80	5	II
zk71	432.49	6	II	zk82	327.23	4	I <sub>1</sub>
zk72	314.75	5	II	zk85	415.44	13	II
zk73	381.70	8	II	zk86	361.68	6	II
zk74	342.55	8	II				

### 秦皇岛经济技术开发区应急管理局区域性地震安全性评价(东区)场地类别图

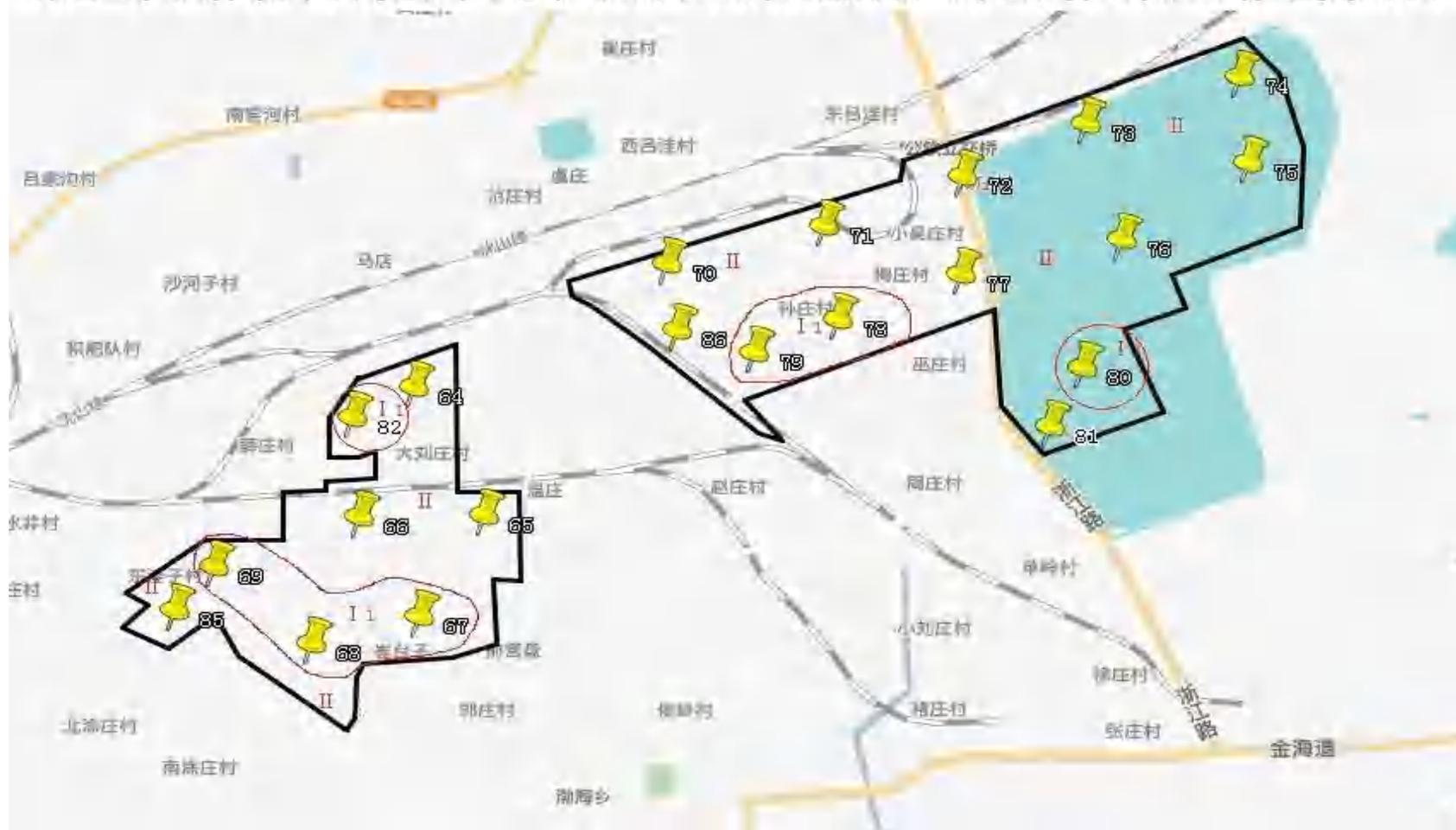


图 4.2.3A 目标区东区场地类别图

## 秦皇岛经济技术开发区应急管理局区域性地震安全性评价(西区)场地类别图

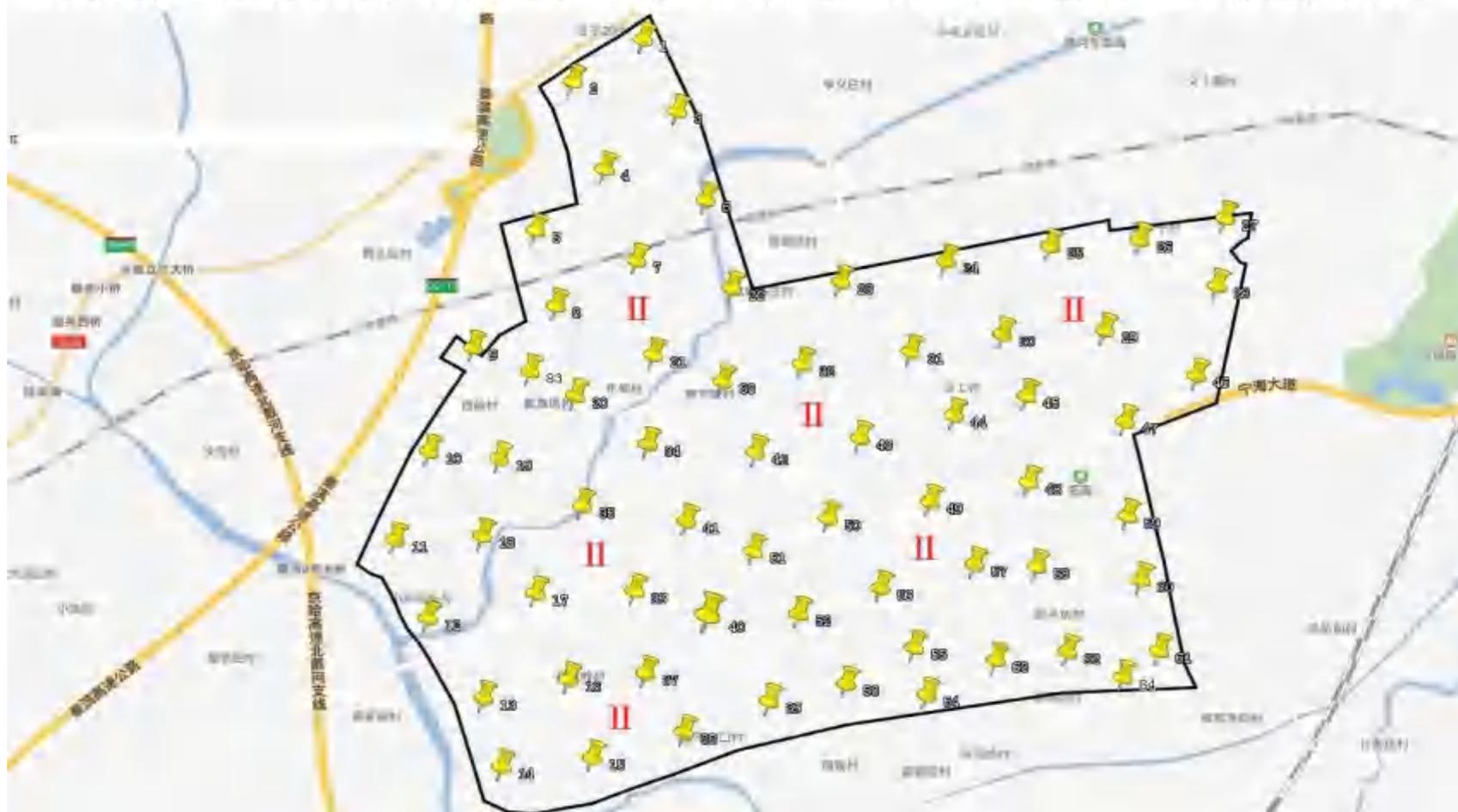


图 4.2.3B 目标区西区场地类别图

### 4.3 场地土层共振柱试验

为了获取各地块场地各代表性土层的动力学特性，并为土层地震动反应分析提供土层动力学数据，对本项目的地基土样进行了共振柱试验工作，试验土样为原状土样，试验的成样、试验方法及试验资料整理均按《土工试验规程》SL237—1999 中的有关规定进行。

#### 4.3.1 试样的制备

本次试验共完成 27 个钻孔 46 组土样的参数测试工作，钻孔分为西区 37 个，东区 9 个。详细土质分类及土样编号抄自土样标签，土样编号与土样标签上的编号一致，根据试验需要给出了与土样编号一一对应的试样编号。试样为 $\phi 39.1\text{mm} \times 80\text{mm}$  的圆柱形。

试验时先对土样进行固结排水，根据土性和取土深度的不同，固结压力取为 100kPa—500kPa，固结时间为 12 小时，详细的土样情况及试验条件列于表 4.3.1 中。

表 4.3.1 目标区试样参数

序号	土样编号	取土深度 (m)	岩土名称	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	取样位置	备注
1	ZK1-2	10.00-10.10	强风化混合花岗岩	2.04	西区	扰动样
2	ZK4-1	0.90-1.00	全风化混合花岗岩	1.89	西区	扰动样
3	ZK4-3	4.80-4.90	强风化混合花岗岩	1.94	西区	含卵砾石，扰动样
4	ZK8-2	3.50-3.60	强风化混合花岗岩片麻岩	1.91	西区	扰动样
5	ZK10-4	7.10-7.30	粉质黏土	1.99	西区	
6	ZK11-4	7.20-7.30	中粗砂	2.07	西区	扰动样
7	ZK11-7	13.50-13.60	中粗砂	2.09	西区	扰动样
8	ZK14-2	5.60-5.80	粉质黏土	1.98	西区	含淤泥质
9	ZK14-4	11.00-11.10	中粗砂	2.08	西区	扰动样
10	ZK14-5	12.80-13.00	粉质黏土	2.01	西区	
11	ZK14-7	16.50-16.60	粗砾砂	2.09	西区	扰动样
12	ZK14-9	26.50-26.70	强风化混合花岗岩	1.99	西区	扰动样
13	ZK17-2	4.50-4.70	粉质黏土	2.02	西区	
14	ZK17-6	20.20-20.30	强风化混合花岗岩片麻岩	2.01	西区	扰动样
15	ZK22-1	4.10-4.20	中粗砂	2.06	西区	扰动样
16	ZK30-2	8.40-8.50	砂质黏性土	1.86	西区	扰动样
17	ZK32-1	5.50-5.60	中粗砂	2.08	西区	扰动样
18	ZK35-2	2.10-2.30	粉质黏土	1.94	西区	
19	ZK35-4	4.40-4.50	中粗砂	2.05	西区	扰动样

序号	土样编号	取土深度(m)	岩土名称	密度(g/cm <sup>3</sup> )	取样位置	备注
20	ZK35-8	18.50-18.60	强风化混合花岗岩片麻岩	2.03	西区	扰动样
21	ZK39-2	3.30-3.50	粉质黏土	2.00	西区	
22	ZK39-3	5.30-5.50	砂质黏性土	1.83	西区	
23	ZK39-4	6.50-6.60	全风化混合花岗岩	1.94	西区	扰动样
24	ZK39-5	8.50-8.60	强风化混合花岗岩	1.89	西区	扰动样
25	ZK42-2	4.60-4.80	粉质黏土	1.97	西区	
26	ZK42-5	9.90-10.00	中粗砂	2.07	西区	含卵砾石, 扰动样
27	ZK44-1	3.30-3.40	全风化混合花岗岩片麻岩	1.93	西区	扰动样
28	ZK47-1	12.90-13.00	强风化混合花岗岩	2.00	西区	扰动样
29	ZK50-1	4.40-4.50	中粗砂	2.05	西区	扰动样
30	ZK50-2	5.30-5.40	全风化混合花岗岩	1.95	西区	扰动样
31	ZK53-1	3.20-3.30	全风化混合花岗岩	1.92	西区	扰动样
32	ZK57-1	1.00-1.20	粉质黏土	1.97	西区	
33	ZK57-2	2.10-2.20	砂质黏性土	1.84	西区	扰动样
34	ZK57-3	4.00-4.10	全风化混合花岗岩	1.93	西区	扰动样
35	ZK60-2	4.90-5.00	全风化混合花岗岩片麻岩	1.94	西区	扰动样
36	ZK60-4	8.90-9.00	强风化混合花岗岩片麻岩	2.01	西区	扰动样
37	ZK63-1	2.40-2.50	全风化混合花岗岩	1.92	西区	扰动样
38	ZK64-2	3.20-3.30	全风化混合花岗岩	2.07	东区	扰动样
39	ZK66-2	8.20-8.30	强风化混合花岗岩	2.06	东区	含卵砾石, 扰动样
40	ZK70-1	3.30-3.50	全风化混合花岗岩	1.96	东区	扰动样
41	ZK72-1	1.20-1.40	粉质黏土	2.04	东区	
42	ZK72-2	2.50-2.70	全风化混合花岗岩	1.92	东区	扰动样
43	ZK75-1	3.90-4.00	全风化混合花岗岩	1.96	东区	含卵砾石, 扰动样
44	ZK75-3	9.90-10.00	强风化混合花岗岩	2.02	东区	扰动样
45	ZK76-1	2.20-2.30	砂质黏性土	1.85	东区	扰动样
46	ZK78-2	10.00-10.10	强风化混合花岗岩	2.04	东区	扰动样

### 4.3.2 试验仪器

试验遵照《土工试验方法标准》（GBT50123-1990）和《土工试验规程》（SL237-1999），在防灾科技学院自美国引进的 TSH-100 型共振柱测试系统上进行。共振柱测试系统如图 4.3.1 所示。



图 4.3.1 TSH-100 型共振柱测试系统设备全貌

TSH-100 型共振柱测试系统的技术指标见表 4.3.2。

表 4.3.2 TSH-100 型共振柱测试系统技术指标

技术指标名称	技术指标值
峰值扭矩	2.33N·m
连续扭矩	0.78N·m
浮动式激振频率范围	0 到 250 Hz
最大剪切行程	± 25°
剪切应变范围	10 <sup>-6</sup> -10 <sup>-2</sup>
光纤应变传感器进行剪应变测量量程	± 6mm
轴向变形测量范围	± 6mm
响应频率	15kHz
标准围压和反压	10.2Kg/cm <sup>2</sup>
光纤应变传感器双输出范围	± 0.1mm 及 ± 5mm
试样直径	39.1mm、50mm、70mm
试样长度	其直径的 2.0-2.5 倍
计算机数字闭环伺服控制循环速率及采样速率	4kHz

### 4.3.3 试验过程与方法

试验时先对土样进行固结排水，根据土性和取土深度的不同，固结压力取为  $1.02\text{Kg/cm}^2$ — $5.1\text{Kg/cm}^2$ ，固结时间为 12 小时，详细的土样情况及试验条件列于表 4.3.1 中。

该系统利用伺服马达控制，采用高频扭转扫频的方式(扫频范围为 0-250Hz)，对试样进行扭转激振，同时以高级的计算机测试软件控制试验全过程。试验时在计算机控制下，土柱首先在一个扭矩作用下产生一个扭转位移，然后突然释放，使之做自由振动。根据振动频率和振幅值，按波动理论计算相应的动剪切模量及动剪应变。根据衰减的振幅值，计算相应的阻尼比。典型的滞回圈和振动衰减曲线如图 4.3.2 所示。



图 4.3.2 典型的滞回圈和振动衰减曲线

### 4.3.4 试验计算方法与结果

已有的试验研究表明，土壤的动应力、应变关系可用 Massing 模型描述

$$\tau_d = \frac{\gamma_d}{a + b\gamma_d} \quad (4.3.1)$$

由此可得动割线剪切模量：

$$G_d = \frac{\tau_d}{\gamma_d} = \frac{1}{a + b\gamma_d} \quad (4.3.2)$$

同时还可得到归一化后的无量纲表达式

$$\frac{G_d}{G_{d\max}} = \frac{1}{1 + \gamma_d / \gamma_r} \quad (4.3.3)$$

在上述各式中， $\tau_d$ —动剪应力， $\gamma_d$ —动剪应变， $\gamma_r = a / b$ —参考剪应变， $a, b$ —试验参数，由试验数据确定。通常， $1 / b = \tau_{ult}$  称为极限抗剪强度， $1 / a = G_{d\max}$

称为最大动剪切模量， $G_d$ —与 $\gamma_d$ 对应的动剪切模量。

此外，试验研究表明，阻尼比存在下述关系：

$$\lambda = \lambda_{\max} \left(1 - \frac{G_d}{G_{d\max}}\right)^M \quad (4.3.4)$$

式中 $\lambda$ —与 $G_d$ 对应的阻尼比， $\lambda_{\max}$ —最大阻尼比， $M$ —试验参数。 $\lambda_{\max}$ ， $M$ 由试验数据确定。

由试验测得的动剪切模量及阻尼比与剪应变的试验数据关系，利用上述公式和最小二乘法进行回归分析可得到所需要的试验参数。

各试样在八个典型剪应变时的剪切模量比和阻尼比列于表 4.3.3 中；各试样的 $G_d / G_{d\max} \sim \gamma_d$ 和 $\lambda \sim \gamma_d$ 的关系曲线详见图 4.3.3。

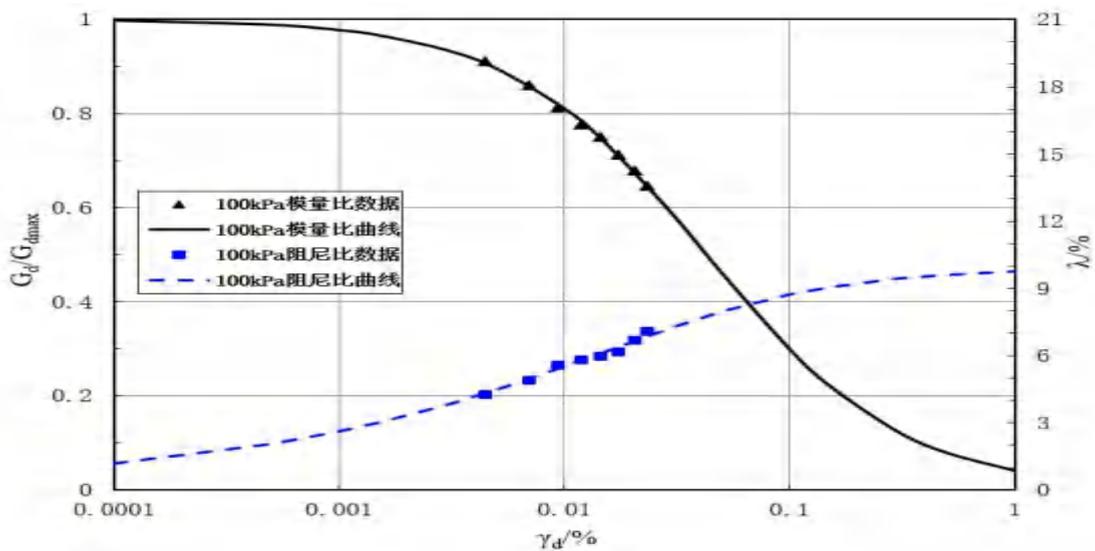
表 4.3.3A 目标区剪切模量比和阻尼比

序号	土样编号	固结压力 Kg/cm <sup>2</sup>	剪切模量比 阻尼比	剪应变 $\gamma_d(10^{-4})$							
				0.05	0.1	0.5	1	5	10	50	100
1	ZK1-2	1	$G_d/G_{d\max}$	0.9885	0.9772	0.8956	0.8109	0.4617	0.3001	0.0790	0.0411
			$\lambda$	0.0206	0.0262	0.0448	0.0551	0.0796	0.0873	0.0961	0.0975
2	ZK4-1	0.5	$G_d/G_{d\max}$	0.9788	0.9585	0.8220	0.6978	0.3159	0.1876	0.0441	0.0226
			$\lambda$	0.0232	0.0329	0.0699	0.0919	0.1402	0.1532	0.1667	0.1686
3	ZK4-3	0.5	$G_d/G_{d\max}$	0.9886	0.9774	0.8965	0.8125	0.4643	0.3023	0.0798	0.0415
			$\lambda$	0.0223	0.0284	0.0485	0.0598	0.0866	0.0950	0.1047	0.1063
4	ZK8-2	0.5	$G_d/G_{d\max}$	0.9889	0.9781	0.8994	0.8172	0.4720	0.3089	0.0821	0.0428
			$\lambda$	0.0184	0.0243	0.0456	0.0583	0.0901	0.1007	0.1132	0.1151
5	ZK10-4	0.75	$G_d/G_{d\max}$	0.9901	0.9804	0.9090	0.8332	0.4997	0.3331	0.0908	0.0476
			$\lambda$	0.0256	0.0319	0.0525	0.0638	0.0911	0.1000	0.1105	0.1122
6	ZK11-4	0.75	$G_d/G_{d\max}$	0.9882	0.9767	0.8934	0.8074	0.4560	0.2953	0.0773	0.0402
			$\lambda$	0.0102	0.0143	0.0300	0.0400	0.0664	0.0753	0.0859	0.0876
7	ZK11-7	1.25	$G_d/G_{d\max}$	0.9880	0.9763	0.8919	0.8049	0.4521	0.2920	0.0762	0.0396
			$\lambda$	0.0063	0.0092	0.0214	0.0297	0.0529	0.0610	0.0708	0.0723
8	ZK14-2	0.5	$G_d/G_{d\max}$	0.9886	0.9775	0.8967	0.8127	0.4646	0.3026	0.0799	0.0416
			$\lambda$	0.0301	0.0380	0.0640	0.0785	0.1124	0.1231	0.1353	0.1372
9	ZK14-4	1	$G_d/G_{d\max}$	0.9879	0.9760	0.8907	0.8029	0.4489	0.2894	0.0753	0.0391
			$\lambda$	0.0066	0.0098	0.0239	0.0339	0.0620	0.0721	0.0841	0.0861

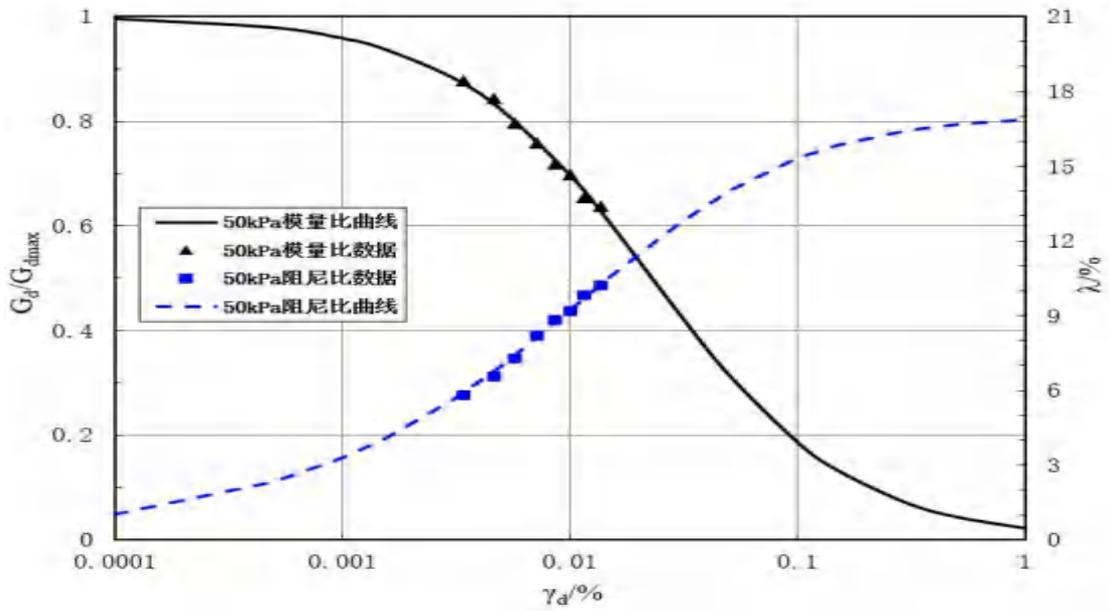
序号	土样 编号	固结压 力 Kg/cm <sup>2</sup>	剪切模量 比 阻尼比	剪应变 $\gamma_d(10^{-4})$							
				0.05	0.1	0.5	1	5	10	50	100
10	ZK14-5	1.25	$G_d/G_{dmax}$	0.9899	0.9801	0.9078	0.8311	0.4961	0.3298	0.0896	0.0469
			$\lambda$	0.0279	0.0341	0.0535	0.0639	0.0882	0.0959	0.1050	0.1064
11	ZK14-7	1.5	$G_d/G_{dmax}$	0.9877	0.9757	0.8893	0.8006	0.4454	0.2865	0.0743	0.0386
			$\lambda$	0.0073	0.0102	0.0217	0.0291	0.0485	0.0550	0.0626	0.0638
12	ZK14-9	2.75	$G_d/G_{dmax}$	0.9888	0.9778	0.8982	0.8153	0.4688	0.3062	0.0811	0.0423
			$\lambda$	0.0105	0.0148	0.0320	0.0432	0.0735	0.0841	0.0969	0.0990
13	ZK17-2	0.5	$G_d/G_{dmax}$	0.9888	0.9778	0.8981	0.8150	0.4684	0.3058	0.0810	0.0422
			$\lambda$	0.0238	0.0297	0.0489	0.0594	0.0839	0.0916	0.1004	0.1017
14	ZK17-6	2	$G_d/G_{dmax}$	0.9871	0.9745	0.8842	0.7924	0.4329	0.2763	0.0709	0.0368
			$\lambda$	0.0105	0.0151	0.0341	0.0466	0.0799	0.0911	0.1041	0.1062
15	ZK22-1	0.5	$G_d/G_{dmax}$	0.9888	0.9779	0.8983	0.8155	0.4691	0.3065	0.0812	0.0423
			$\lambda$	0.0115	0.0160	0.0333	0.0445	0.0741	0.0843	0.0966	0.0985
16	ZK30-2	1	$G_d/G_{dmax}$	0.9887	0.9777	0.8977	0.8143	0.4673	0.3049	0.0806	0.0420
			$\lambda$	0.0335	0.0408	0.0636	0.0755	0.1025	0.1108	0.1201	0.1216
17	ZK32-1	0.5	$G_d/G_{dmax}$	0.9883	0.9769	0.8943	0.8088	0.4584	0.2973	0.0780	0.0406
			$\lambda$	0.0114	0.0158	0.0331	0.0441	0.0731	0.0829	0.0945	0.0964
18	ZK35-2	0.5	$G_d/G_{dmax}$	0.9889	0.9781	0.8993	0.8171	0.4718	0.3087	0.0820	0.0428
			$\lambda$	0.0262	0.0320	0.0501	0.0597	0.0815	0.0882	0.0959	0.0971
19	ZK35-4	0.5	$G_d/G_{dmax}$	0.9882	0.9767	0.8936	0.8077	0.4565	0.2958	0.0775	0.0403
			$\lambda$	0.0113	0.0158	0.0331	0.0441	0.0731	0.0829	0.0945	0.0963
20	ZK35-8	1.75	$G_d/G_{dmax}$	0.9871	0.9745	0.8844	0.7928	0.4334	0.2767	0.0711	0.0368
			$\lambda$	0.0106	0.0152	0.0340	0.0465	0.0794	0.0905	0.1034	0.1054
21	ZK39-2	0.5	$G_d/G_{dmax}$	0.9884	0.9770	0.8947	0.8094	0.4592	0.2981	0.0783	0.0407
			$\lambda$	0.0247	0.0306	0.0493	0.0595	0.0825	0.0895	0.0975	0.0988
22	ZK39-3	0.5	$G_d/G_{dmax}$	0.9884	0.9770	0.8947	0.8094	0.4593	0.2981	0.0783	0.0407
			$\lambda$	0.0262	0.0343	0.0624	0.0788	0.1188	0.1316	0.1465	0.1489
23	ZK39-4	0.75	$G_d/G_{dmax}$	0.9789	0.9586	0.8225	0.6985	0.3166	0.1881	0.0443	0.0226
			$\lambda$	0.0213	0.0300	0.0635	0.0833	0.1268	0.1386	0.1507	0.1524

序号	土样 编号	固结压 力 Kg/cm <sup>2</sup>	剪切模量 比 阻尼比	剪应变 $\gamma_d(10^{-4})$							
				0.05	0.1	0.5	1	5	10	50	100
24	ZK39-5	0.75	$G_d/G_{dmax}$	0.9885	0.9772	0.8955	0.8108	0.4615	0.3000	0.0789	0.0411
			$\lambda$	0.0194	0.0250	0.0442	0.0553	0.0817	0.0901	0.0999	0.1014
25	ZK42-2	0.5	$G_d/G_{dmax}$	0.9886	0.9775	0.8967	0.8127	0.4646	0.3026	0.0799	0.0416
			$\lambda$	0.0248	0.0307	0.0494	0.0594	0.0824	0.0895	0.0976	0.0988
26	ZK42-5	1	$G_d/G_{dmax}$	0.9879	0.9760	0.8907	0.8029	0.4489	0.2894	0.0753	0.0391
			$\lambda$	0.0060	0.0091	0.0233	0.0336	0.0635	0.0744	0.0875	0.0896
27	ZK44-1	0.5	$G_d/G_{dmax}$	0.9785	0.9579	0.8200	0.6949	0.3129	0.1855	0.0436	0.0223
			$\lambda$	0.0263	0.0361	0.0719	0.0923	0.1356	0.1470	0.1586	0.1603
28	ZK47-1	1.25	$G_d/G_{dmax}$	0.9885	0.9772	0.8954	0.8107	0.4613	0.2998	0.0789	0.0411
			$\lambda$	0.0181	0.0236	0.0427	0.0538	0.0809	0.0896	0.0997	0.1013
29	ZK50-1	0.5	$G_d/G_{dmax}$	0.9882	0.9767	0.8936	0.8077	0.4565	0.2958	0.0775	0.0403
			$\lambda$	0.0119	0.0164	0.0338	0.0447	0.0733	0.0829	0.0943	0.0961
30	ZK50-2	0.5	$G_d/G_{dmax}$	0.9778	0.9566	0.8152	0.6880	0.3061	0.1807	0.0422	0.0216
			$\lambda$	0.0199	0.0287	0.0629	0.0835	0.1288	0.1410	0.1534	0.1552
31	ZK53-1	0.5	$G_d/G_{dmax}$	0.9793	0.9594	0.8254	0.7027	0.3210	0.1912	0.0451	0.0231
			$\lambda$	0.0272	0.0371	0.0724	0.0924	0.1349	0.1462	0.1578	0.1594
32	ZK57-1	0.5	$G_d/G_{dmax}$	0.9889	0.9781	0.8995	0.8173	0.4722	0.3091	0.0821	0.0428
			$\lambda$	0.0244	0.0303	0.0492	0.0595	0.0834	0.0908	0.0994	0.1007
33	ZK57-2	0.5	$G_d/G_{dmax}$	0.9881	0.9765	0.8928	0.8063	0.4544	0.2940	0.0769	0.0400
			$\lambda$	0.0258	0.0338	0.0621	0.0786	0.1188	0.1317	0.1466	0.1489
34	ZK57-3	0.5	$G_d/G_{dmax}$	0.9790	0.9588	0.8233	0.6996	0.3178	0.1889	0.0445	0.0228
			$\lambda$	0.0268	0.0367	0.0722	0.0924	0.1352	0.1465	0.1581	0.1598
35	ZK60-2	0.5	$G_d/G_{dmax}$	0.9783	0.9575	0.8182	0.6924	0.3104	0.1837	0.0431	0.0220
			$\lambda$	0.0202	0.0290	0.0629	0.0833	0.1282	0.1403	0.1528	0.1545
36	ZK60-4	1	$G_d/G_{dmax}$	0.9885	0.9772	0.8956	0.8109	0.4617	0.3001	0.0790	0.0411
			$\lambda$	0.0241	0.0301	0.0492	0.0596	0.0836	0.0910	0.0994	0.1007
37	ZK63-1	0.5	$G_d/G_{dmax}$	0.9796	0.9600	0.8275	0.7058	0.3242	0.1935	0.0458	0.0234
			$\lambda$	0.0273	0.0372	0.0726	0.0926	0.1356	0.1470	0.1587	0.1604

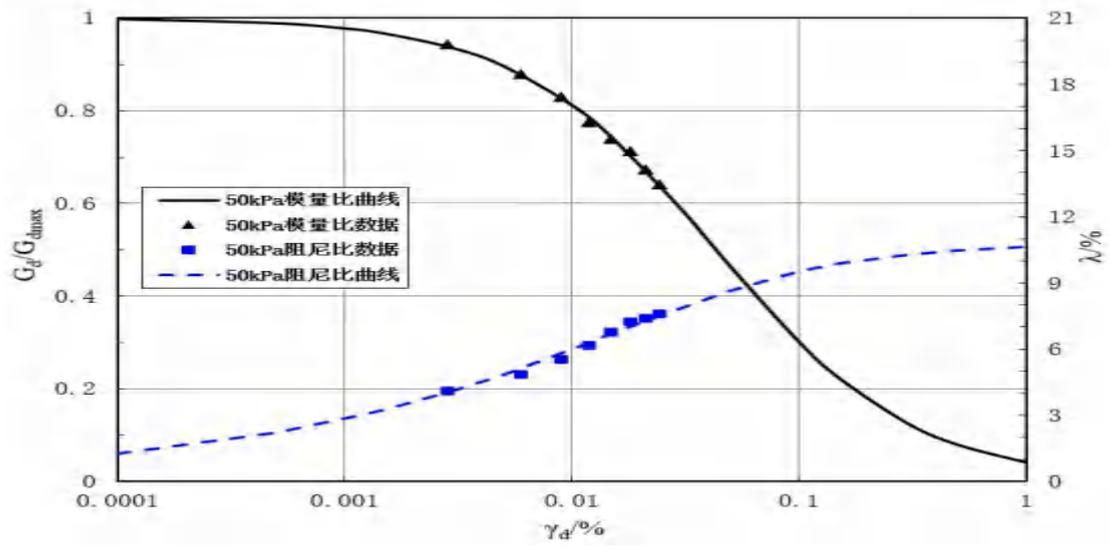
序号	土样 编号	固结压 力 Kg/cm <sup>2</sup>	剪切模量 比 阻尼比	剪应变 $\gamma_d(10^{-4})$							
				0.05	0.1	0.5	1	5	10	50	100
38	ZK64-2	0.5	$G_d/G_{dmax}$	0.9890	0.9783	0.9001	0.8184	0.4741	0.3107	0.0827	0.0431
			$\lambda$	0.0117	0.0162	0.0335	0.0444	0.0735	0.0835	0.0957	0.0976
39	ZK66-2	0.75	$G_d/G_{dmax}$	0.9853	0.9711	0.8704	0.7706	0.4018	0.2514	0.0629	0.0325
			$\lambda$	0.0180	0.0240	0.0449	0.0571	0.0852	0.0936	0.1028	0.1042
40	ZK70-1	0.5	$G_d/G_{dmax}$	0.9777	0.9564	0.8142	0.6866	0.3047	0.1797	0.0420	0.0214
			$\lambda$	0.0270	0.0370	0.0725	0.0925	0.1340	0.1448	0.1556	0.1572
41	ZK72-1	0.5	$G_d/G_{dmax}$	0.9889	0.9781	0.8995	0.8173	0.4722	0.3091	0.0821	0.0428
			$\lambda$	0.0248	0.0307	0.0496	0.0599	0.0836	0.0910	0.0996	0.1009
42	ZK72-2	0.5	$G_d/G_{dmax}$	0.9774	0.9557	0.8119	0.6833	0.3015	0.1775	0.0414	0.0211
			$\lambda$	0.0250	0.0349	0.0713	0.0923	0.1365	0.1479	0.1596	0.1612
43	ZK75-1	0.5	$G_d/G_{dmax}$	0.9773	0.9557	0.8118	0.6833	0.3014	0.1774	0.0414	0.0211
			$\lambda$	0.0215	0.0300	0.0613	0.0793	0.1172	0.1270	0.1370	0.1384
44	ZK75-3	1	$G_d/G_{dmax}$	0.9876	0.9756	0.8887	0.7997	0.4439	0.2853	0.0739	0.0384
			$\lambda$	0.0174	0.0230	0.0430	0.0548	0.0834	0.0925	0.1029	0.1046
45	ZK76-1	0.5	$G_d/G_{dmax}$	0.9880	0.9763	0.8917	0.8046	0.4516	0.2917	0.0761	0.0395
			$\lambda$	0.0251	0.0332	0.0617	0.0786	0.1199	0.1331	0.1484	0.1508
46	ZK78-2	1	$G_d/G_{dmax}$	0.9885	0.9772	0.8956	0.8109	0.4617	0.3001	0.0790	0.0411
			$\lambda$	0.0181	0.0236	0.0426	0.0537	0.0806	0.0892	0.0992	0.1008



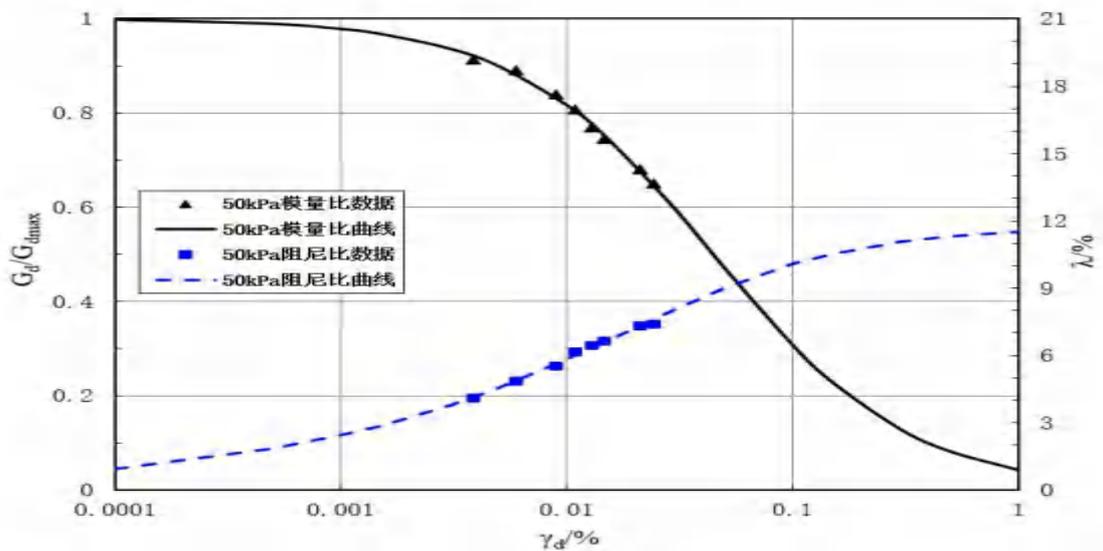
(1) ZK1-2 土样



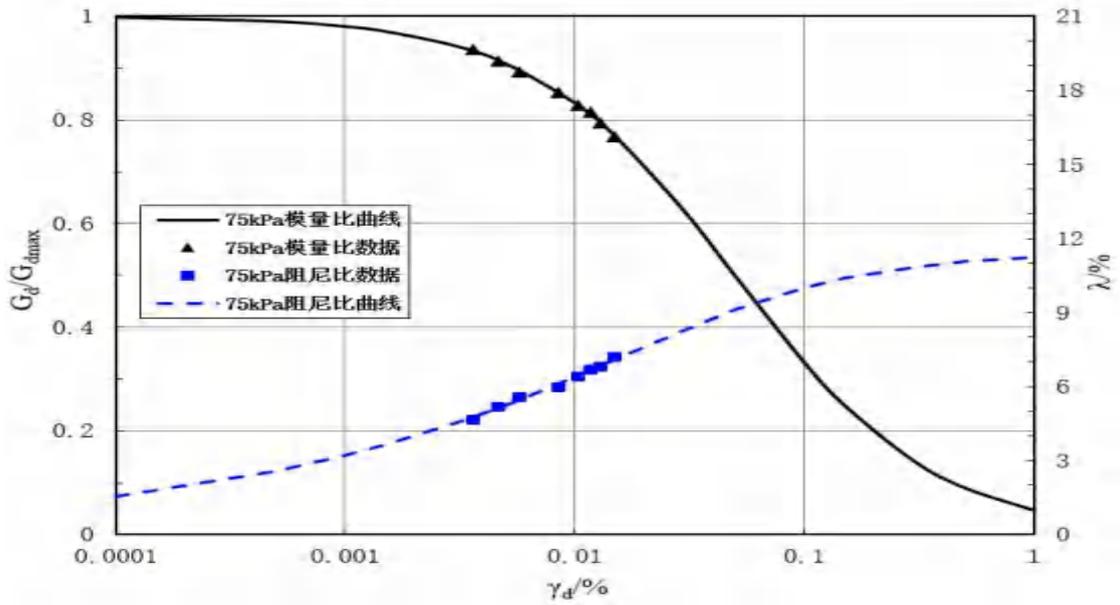
(2) ZK4-1 土样



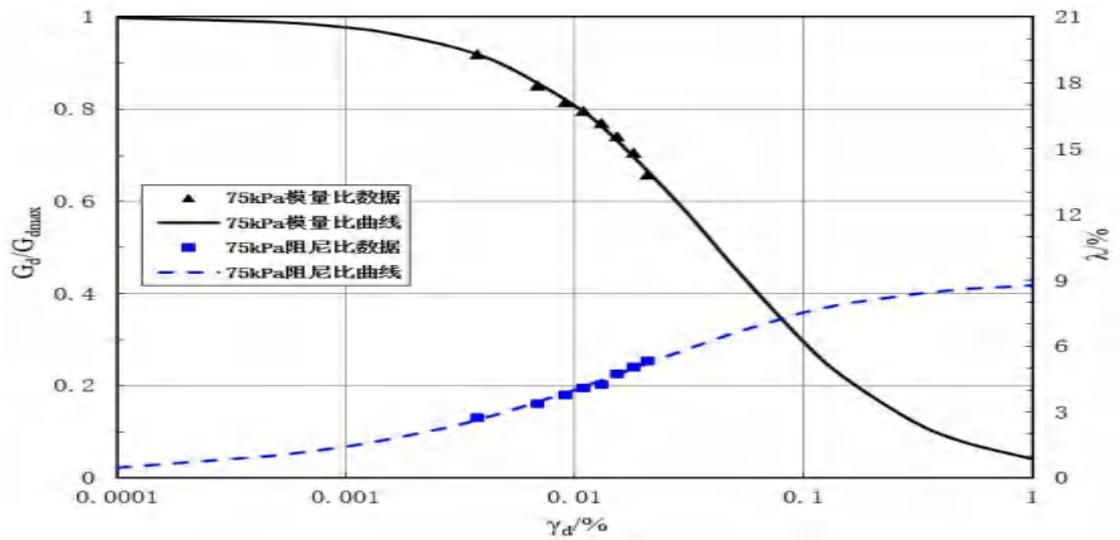
(3) ZK4-3 土样



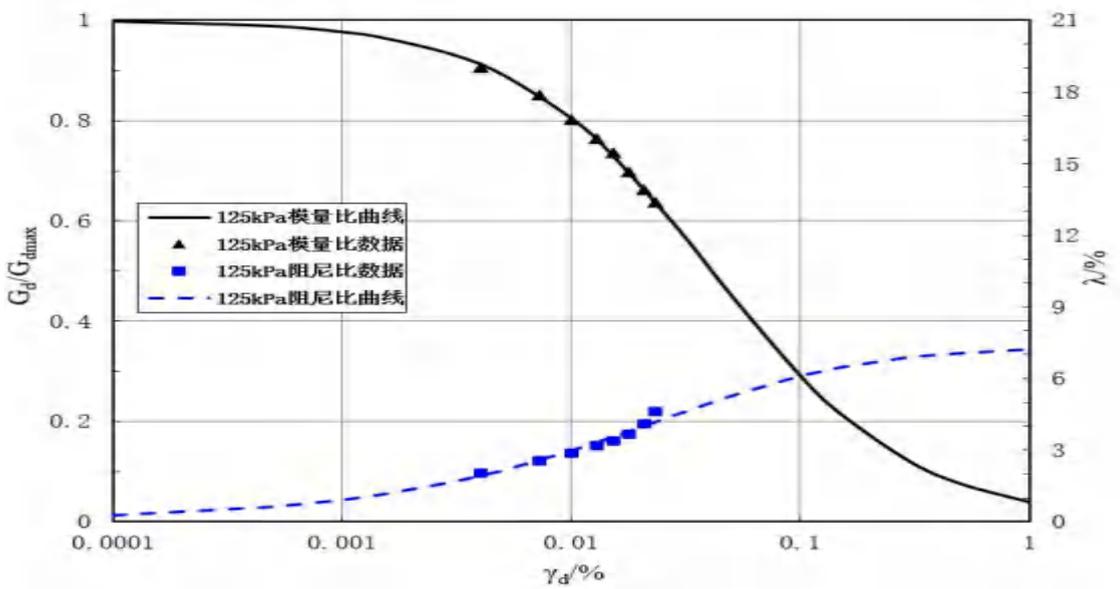
(4) ZK8-2 土样



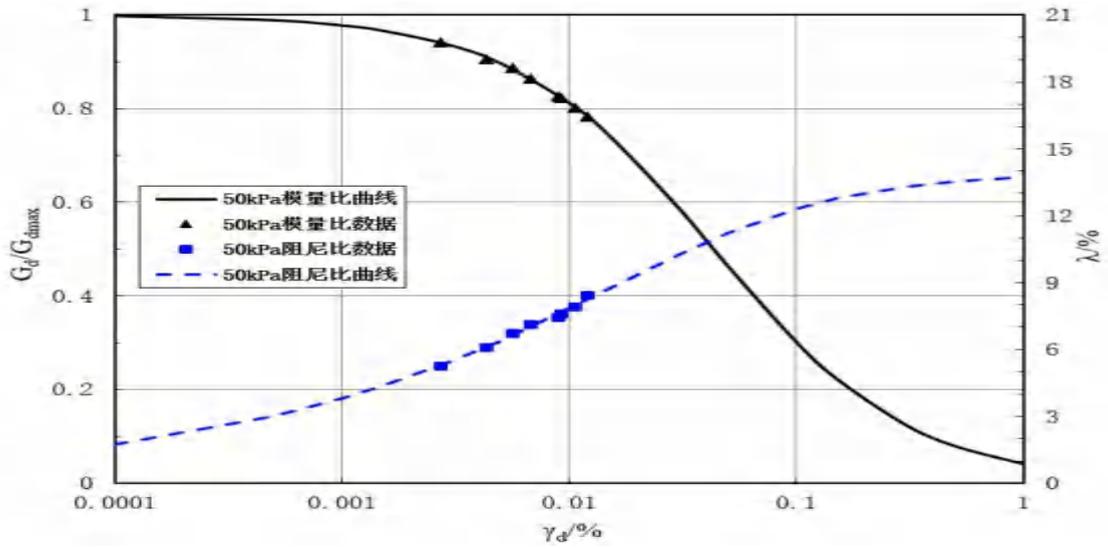
(5) ZK10-4 土样



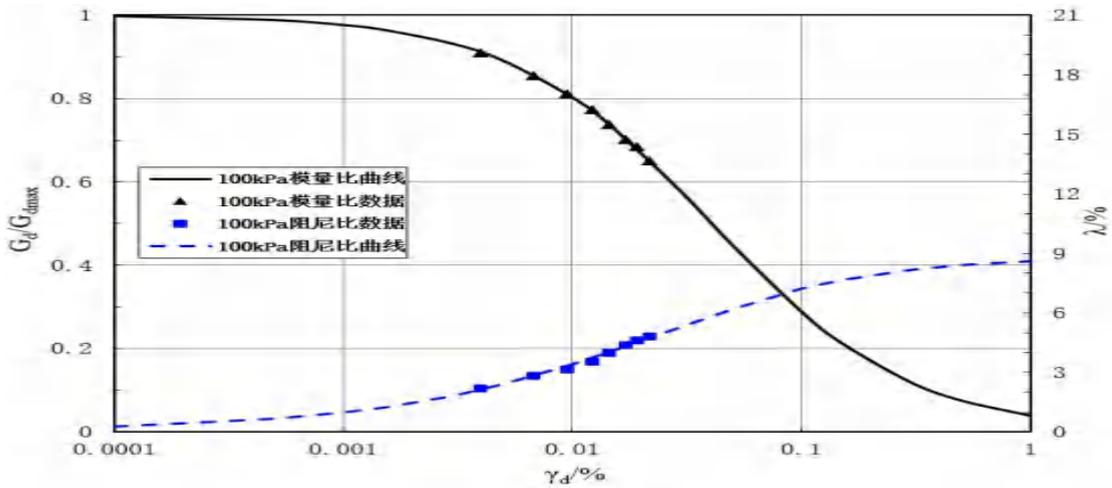
(6) ZK11-4 土样



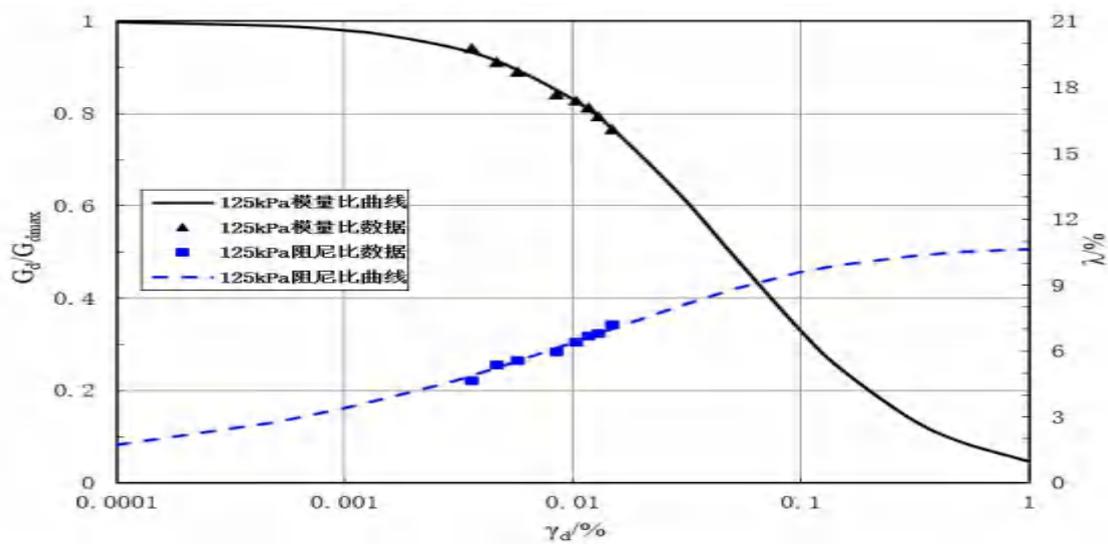
(7) ZK11-7 土样



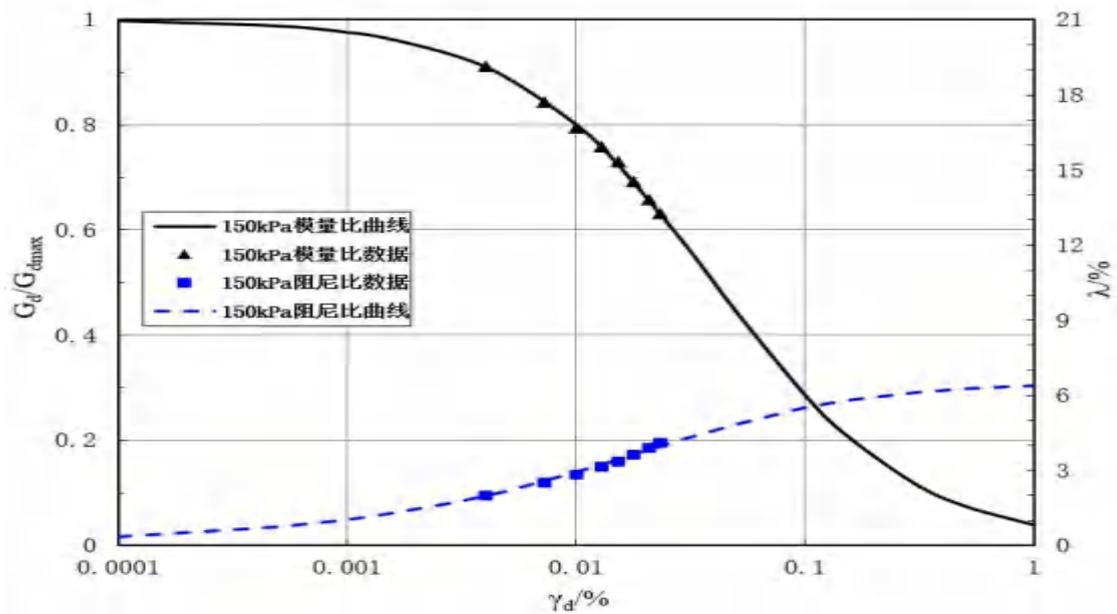
(8) ZK14-2 土样



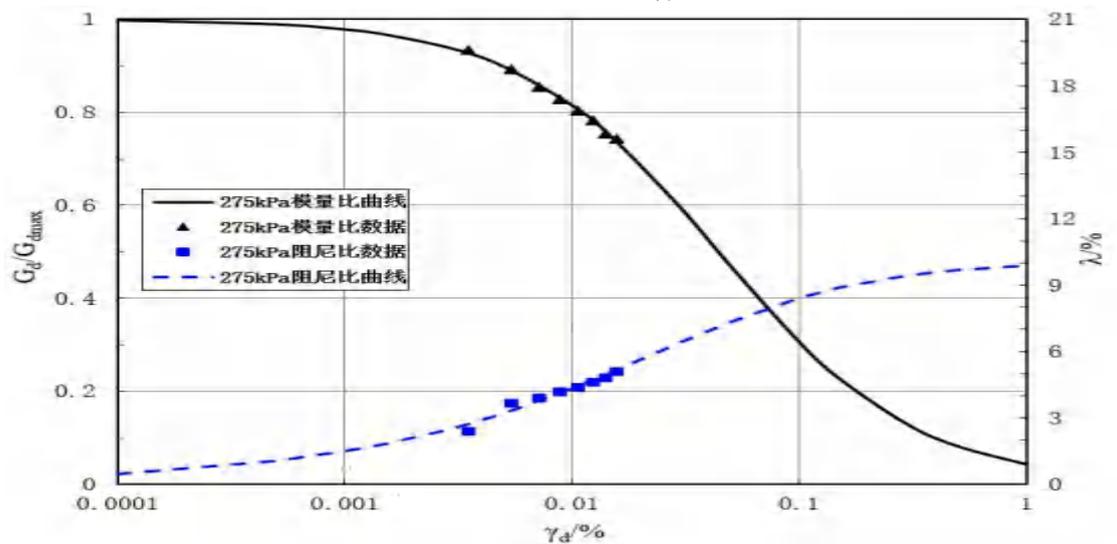
(9) ZK14-4 土样



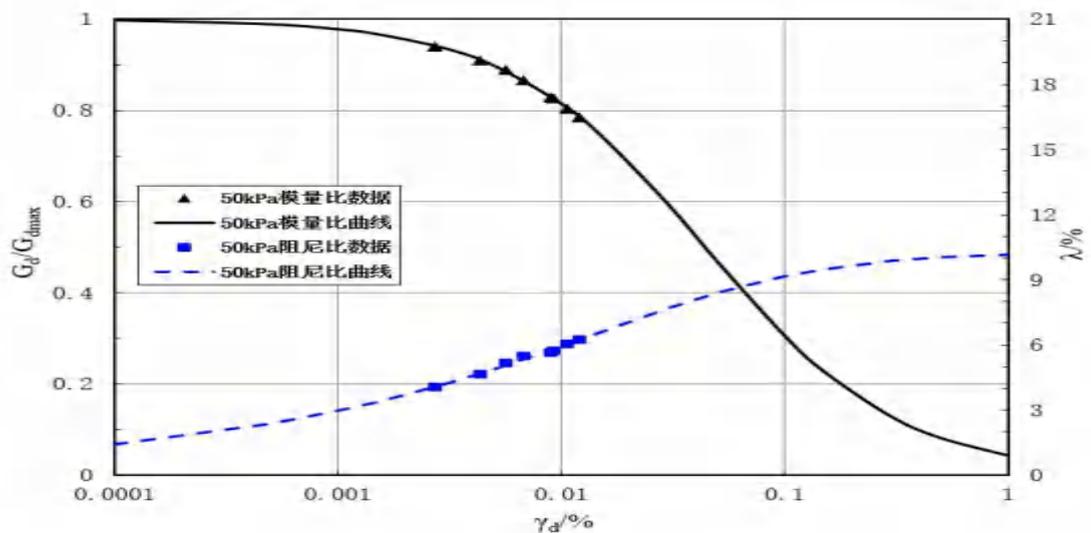
(10) ZK14-5 土样



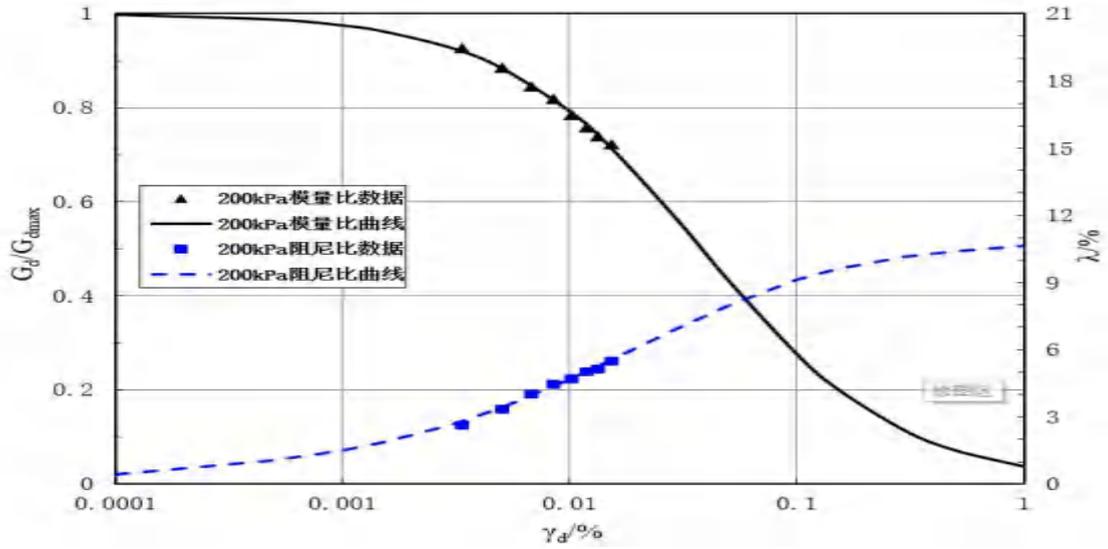
(11) ZK14-7 土样



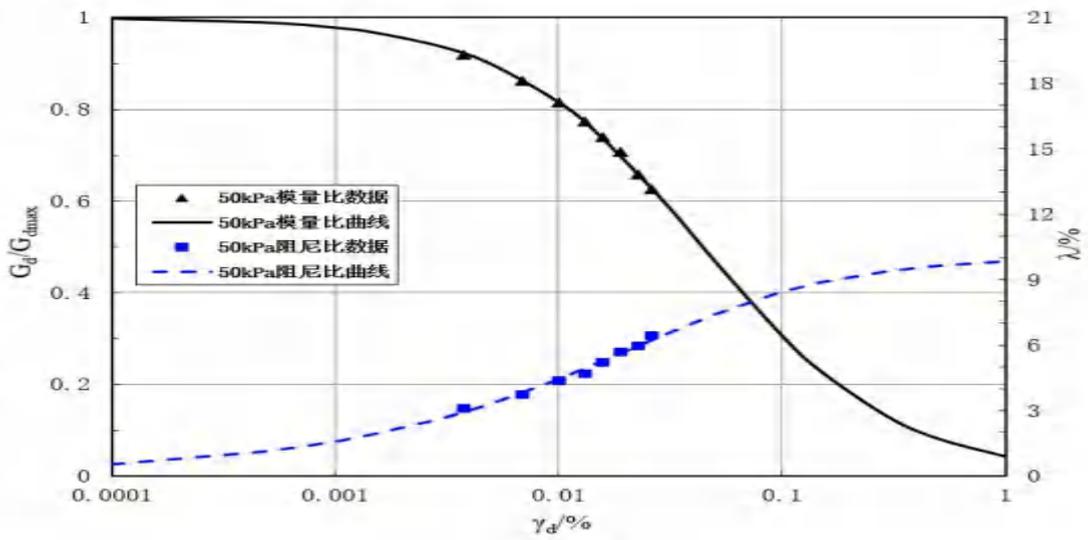
(12) ZK14-9 土样



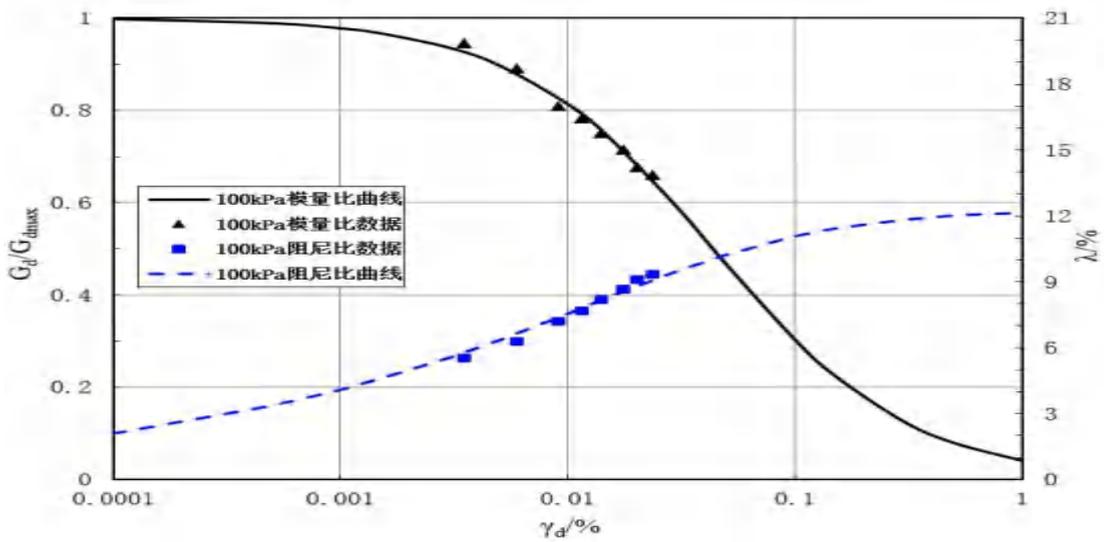
(13) ZK17-2 土样



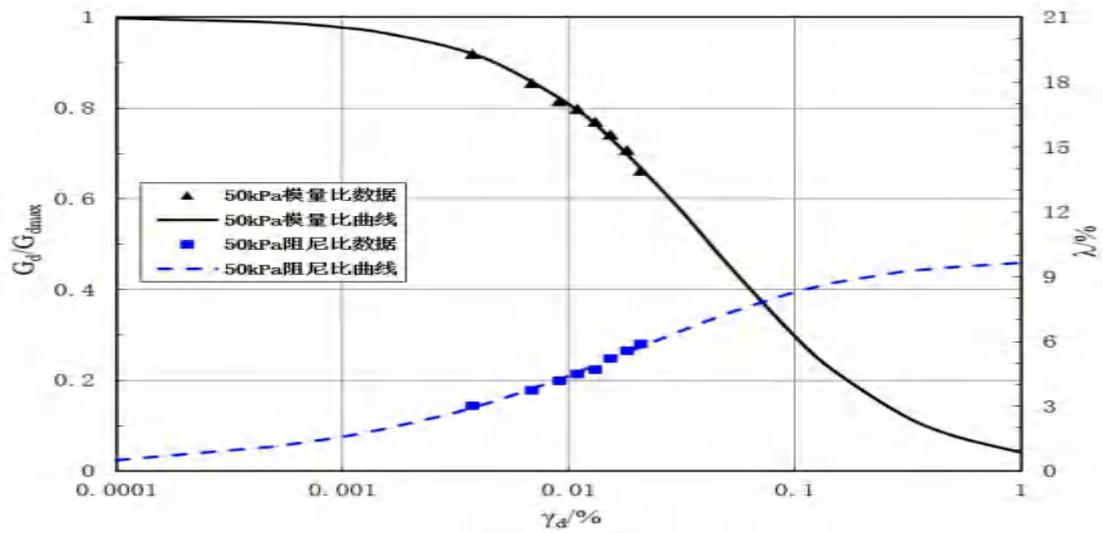
(14) ZK17-6 土样



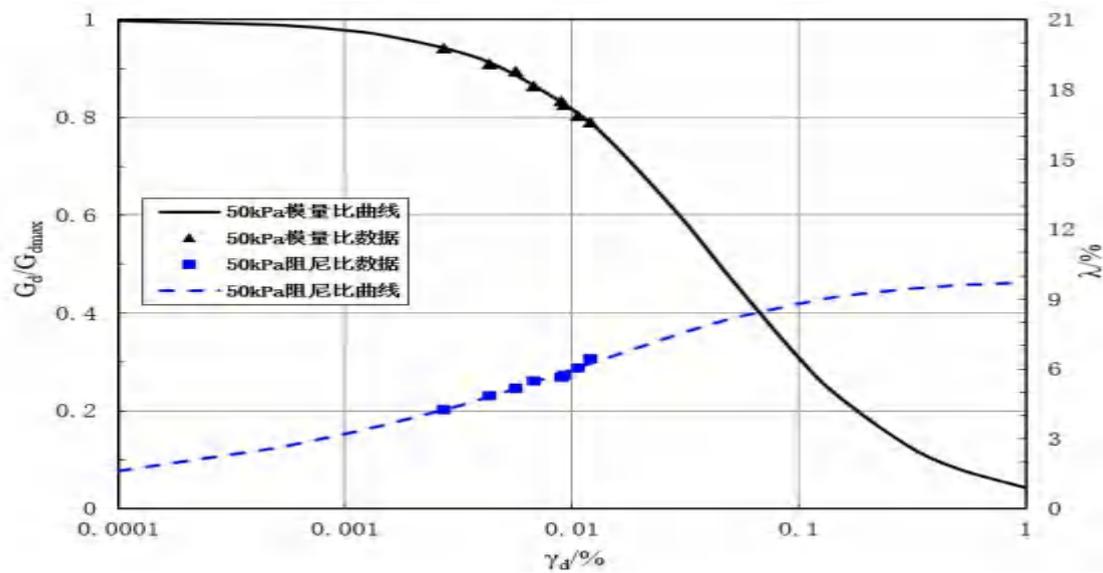
(15) ZK22-1 土样



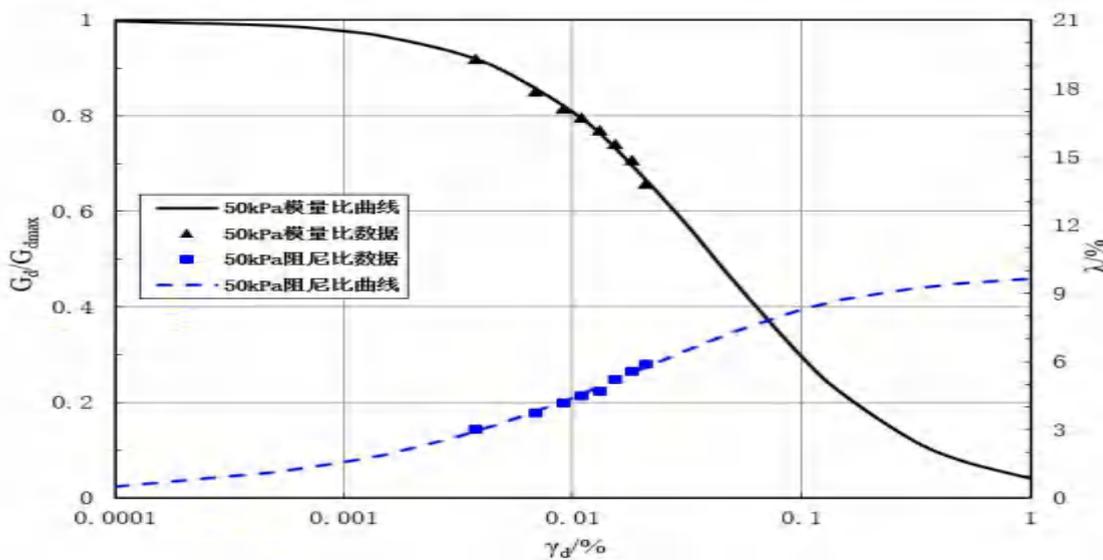
(16) ZK30-2 土样



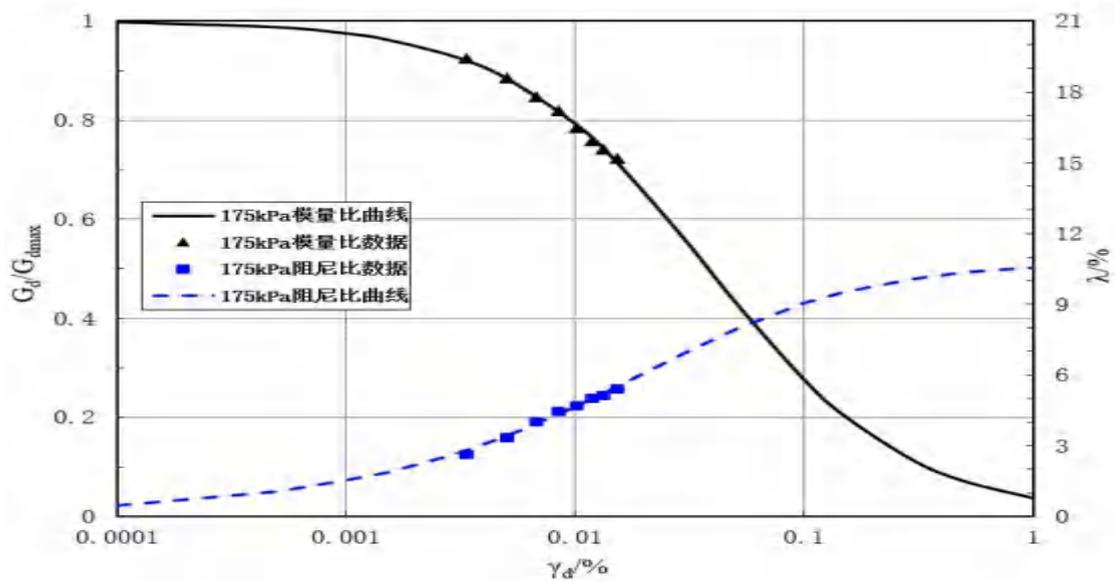
(17) ZK32-1 土样



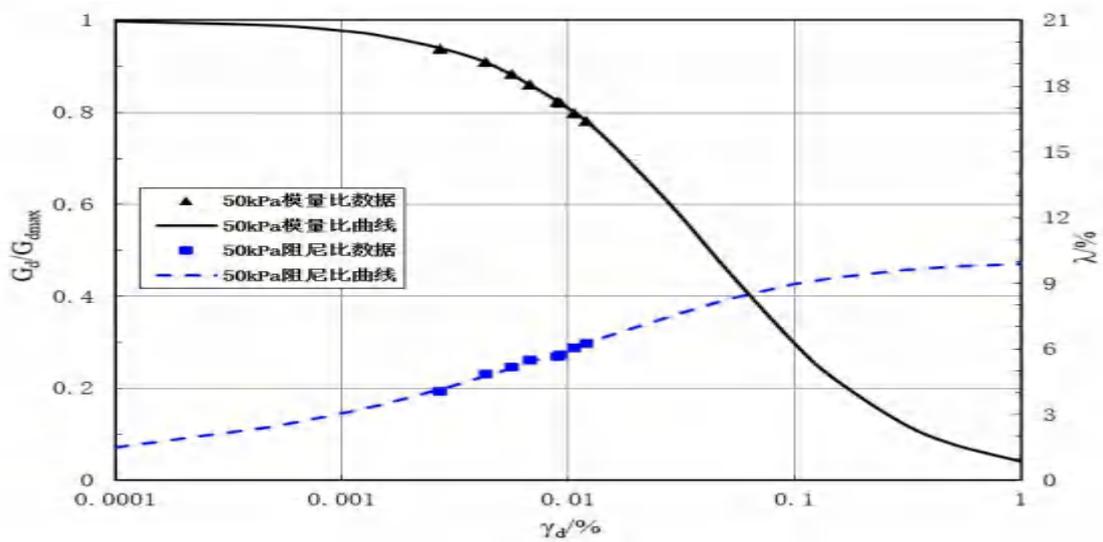
(18) ZK35-2 土样



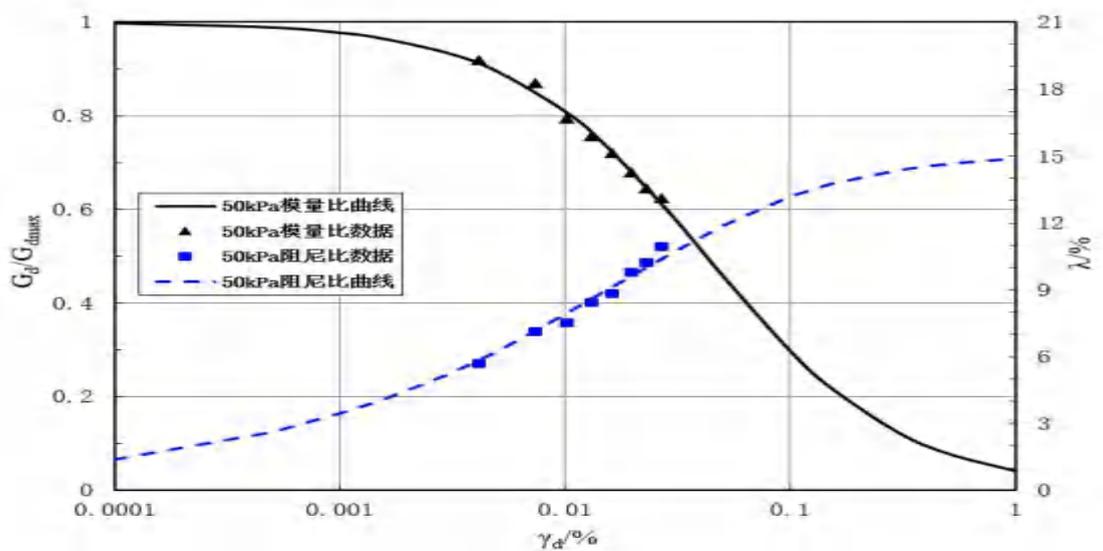
(19) ZK35-4 土样



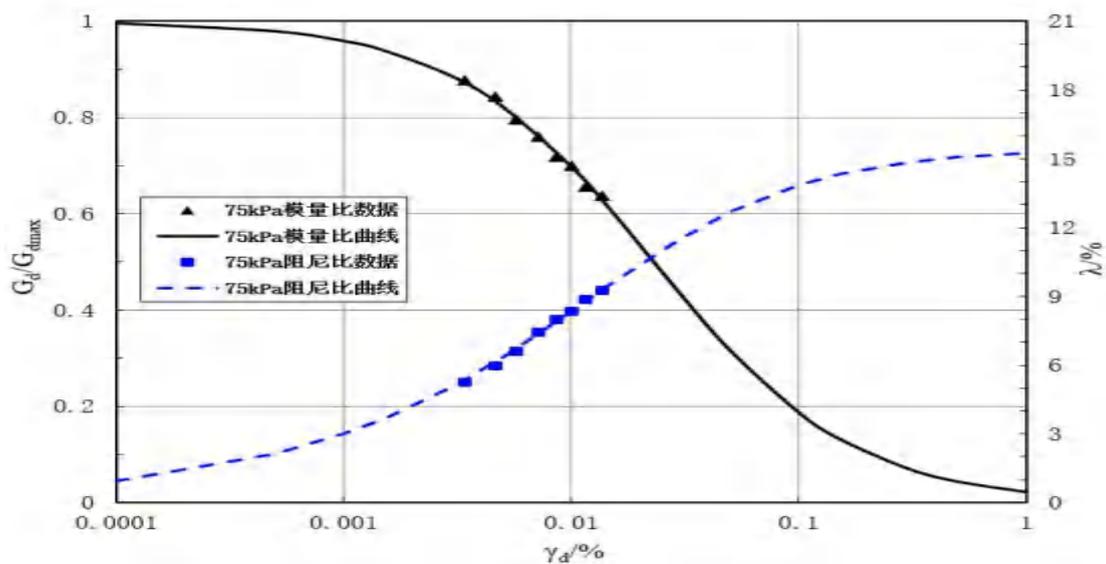
(20) ZK35-8 土样



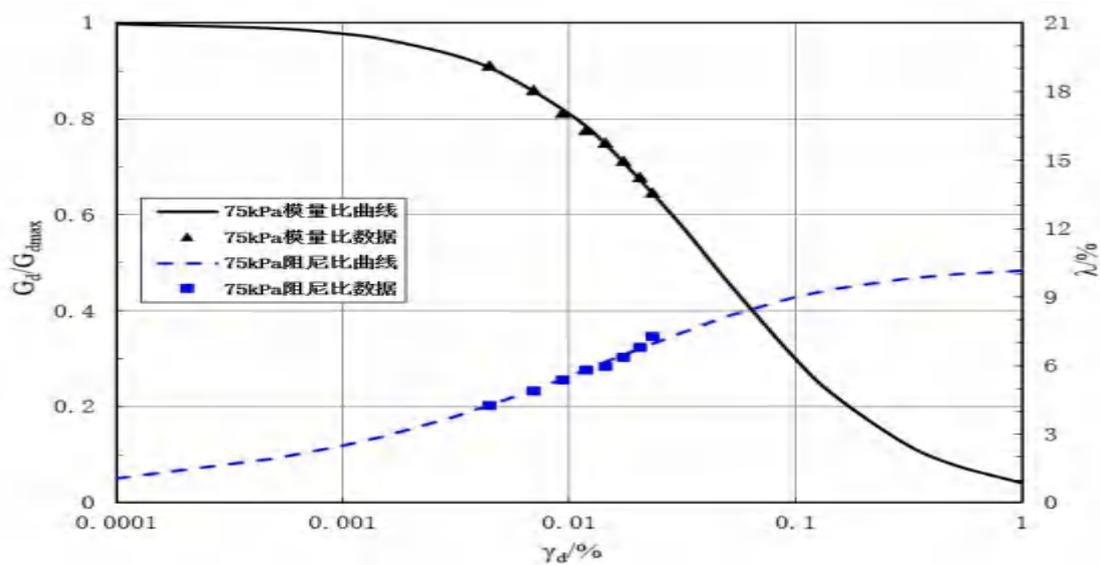
(21) ZK39-2 土样



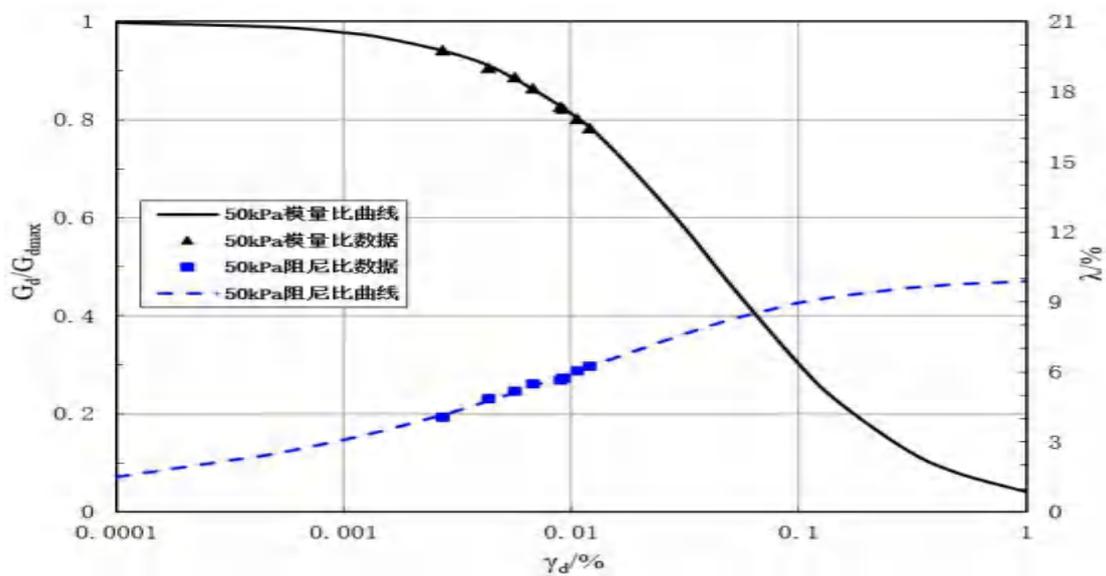
(22) ZK39-3 土样



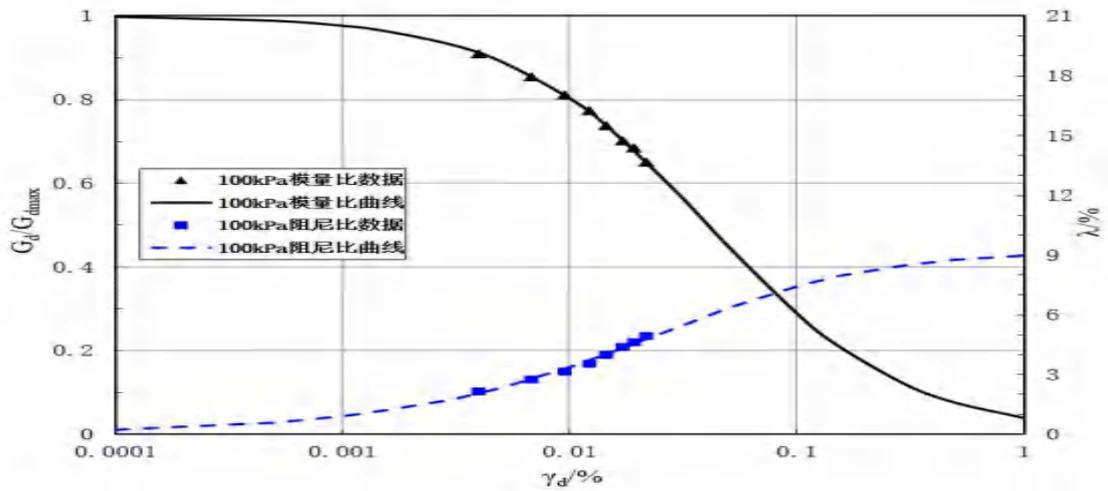
(23) ZK39-4 土样



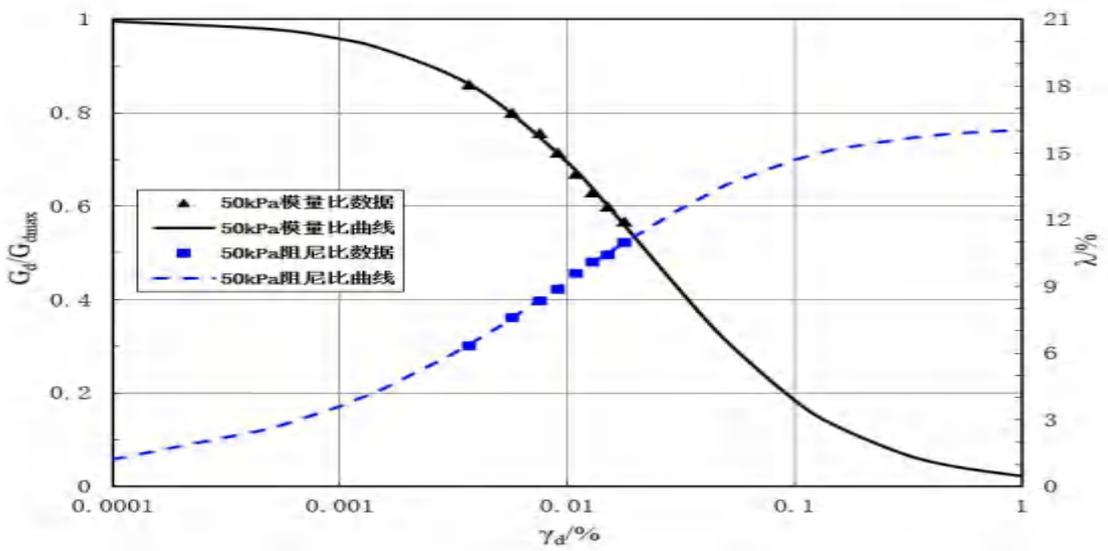
(24) ZK39-5 土样



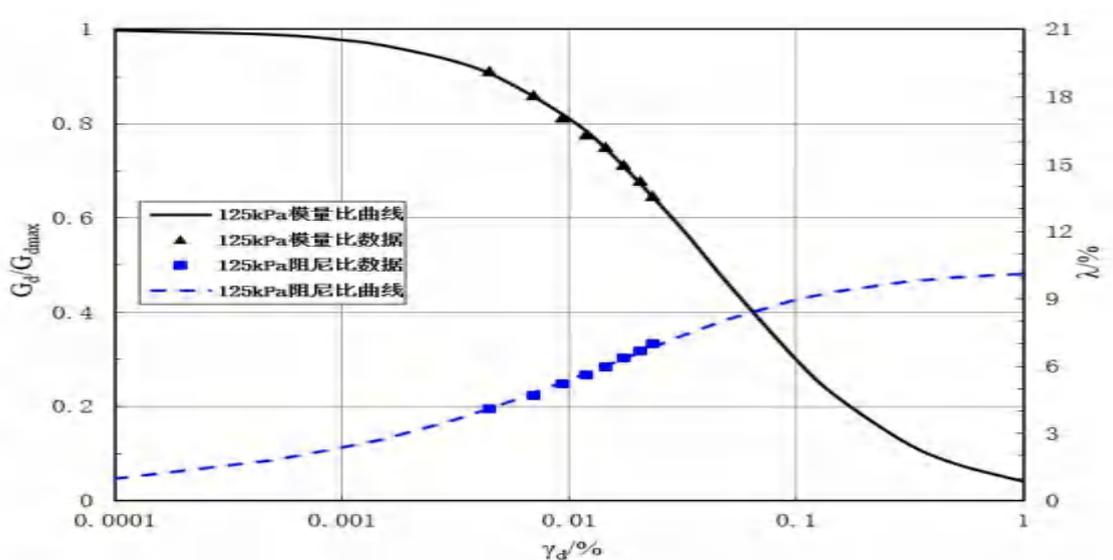
(25) ZK42-2 土样



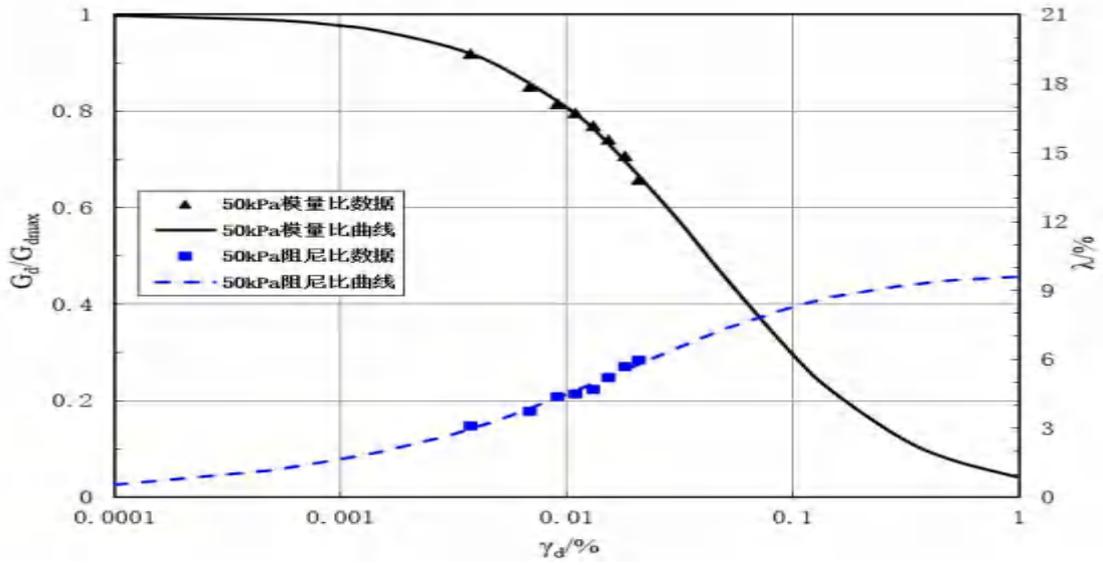
(26) ZK42-5 土样



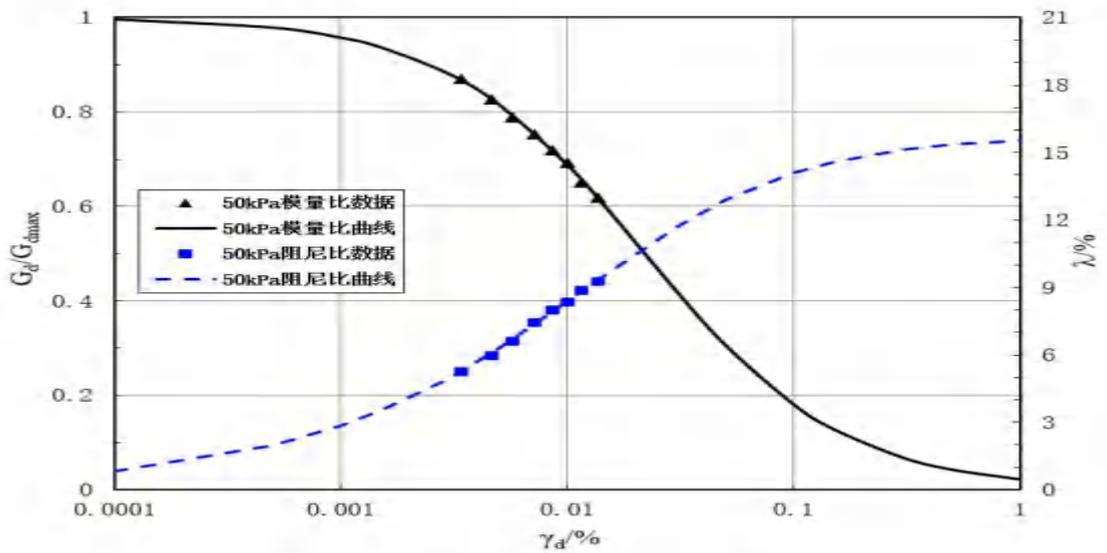
(27) ZK44-1 土样



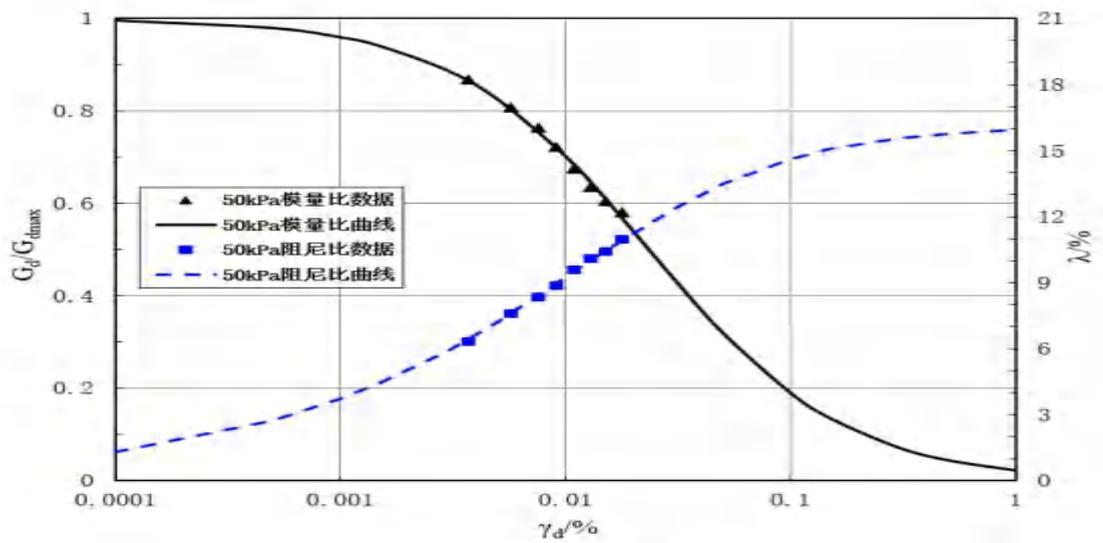
(28) ZK47-1 土样



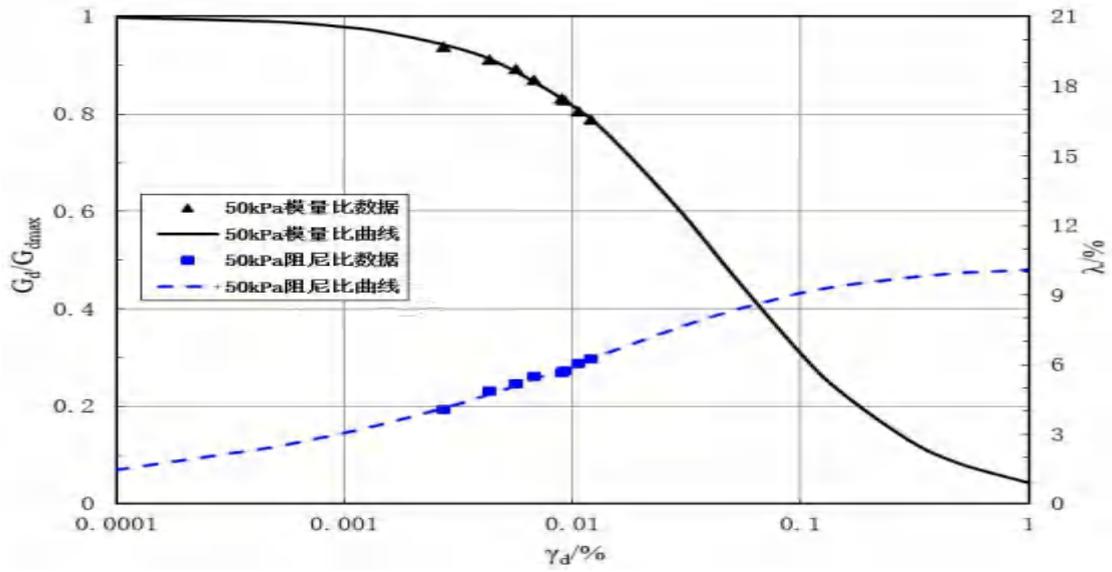
(29) ZK50-1 土样



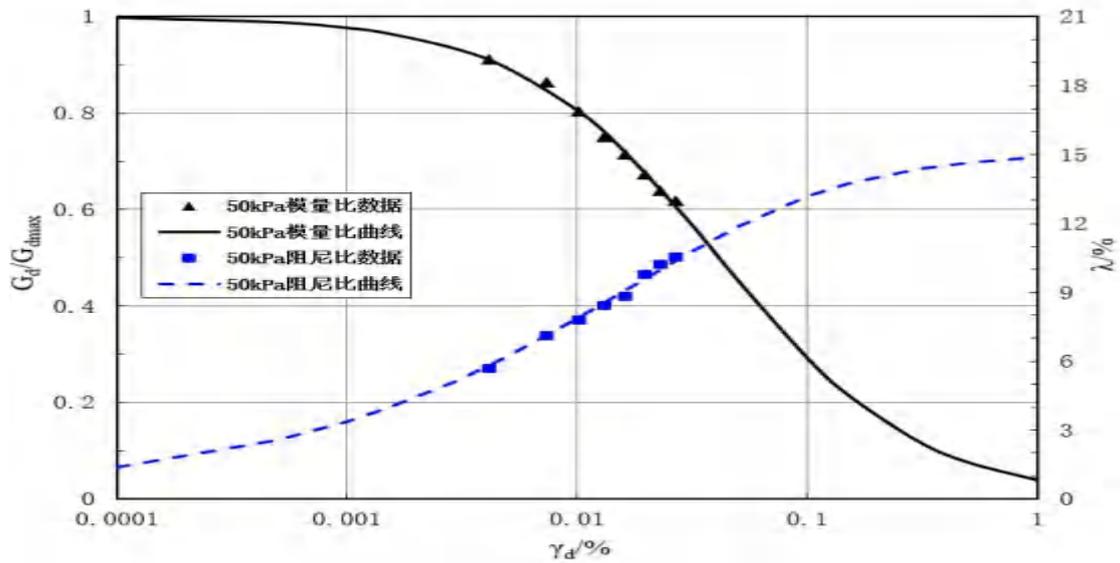
(30) ZK50-2 土样



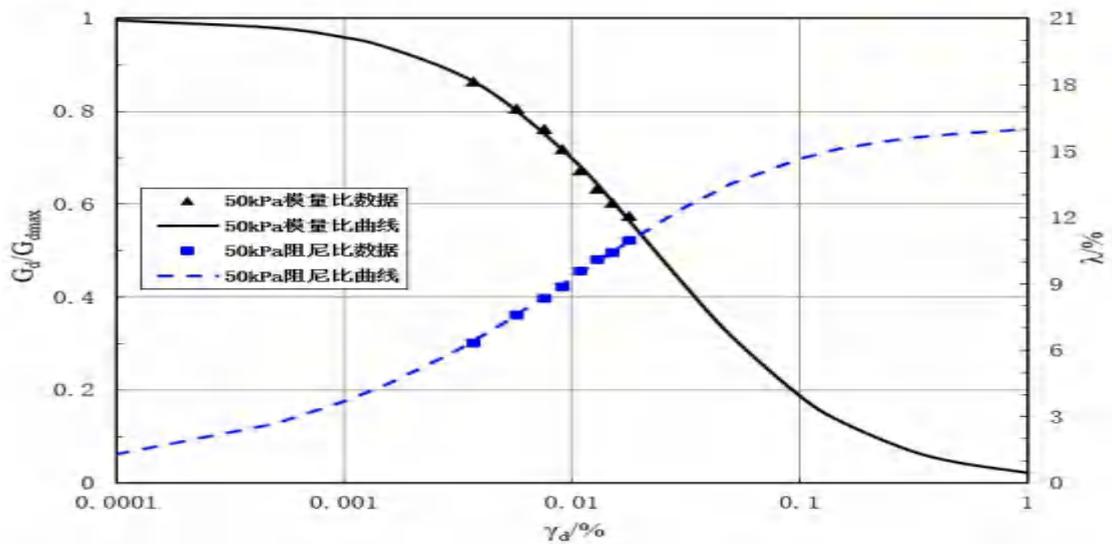
(31) ZK53-1 土样



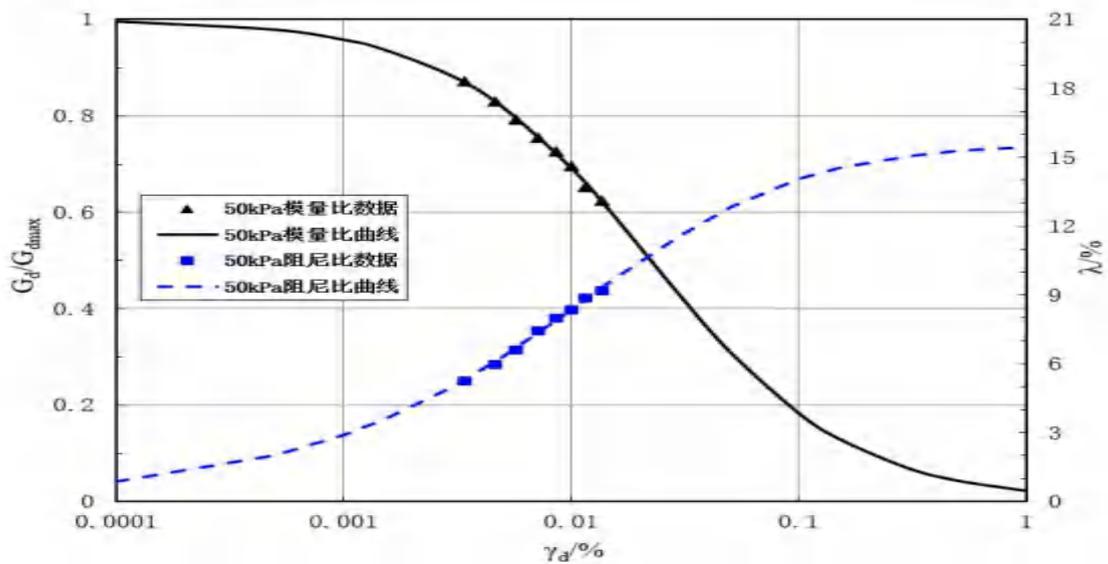
(32) ZK57-1 土样



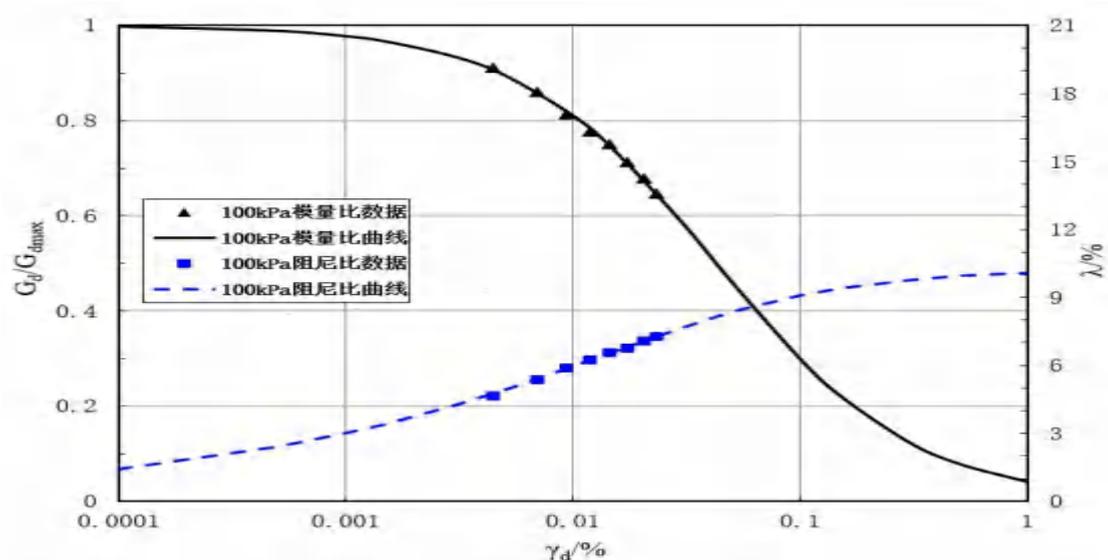
(33) ZK57-2 土样



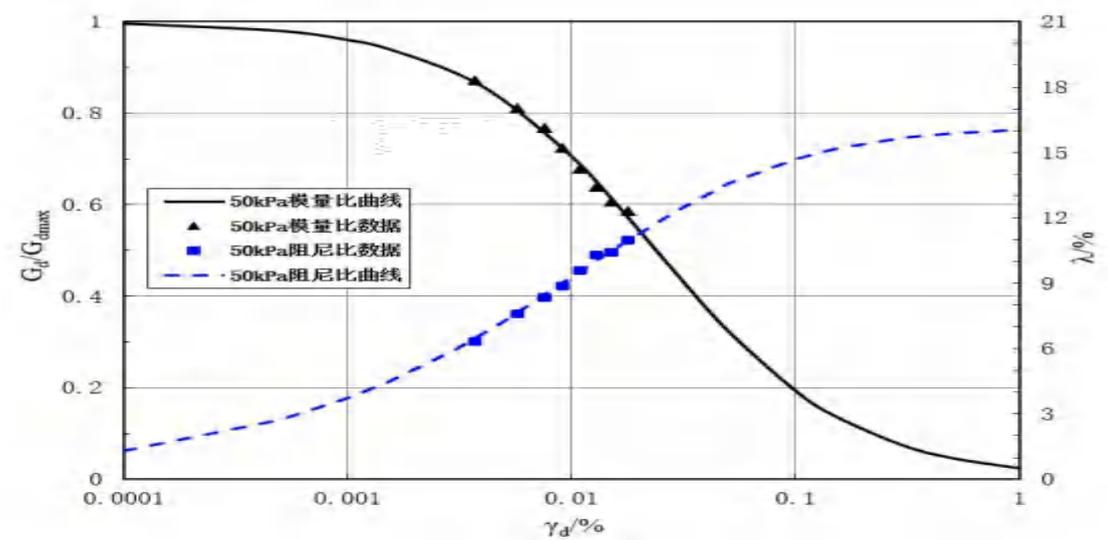
(34) ZK57-3 土样



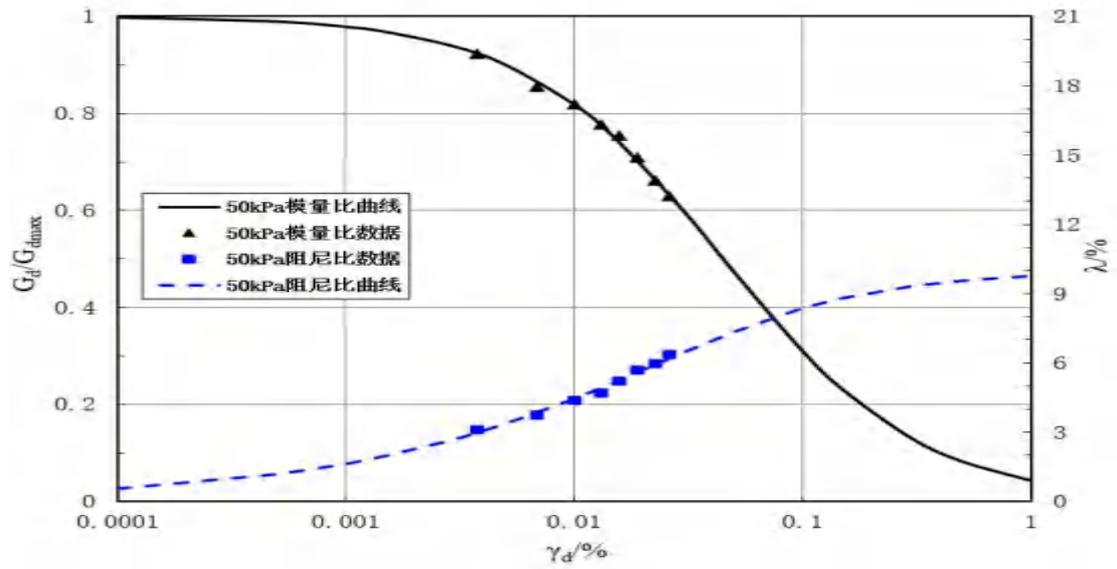
(35) ZK60-2 土样



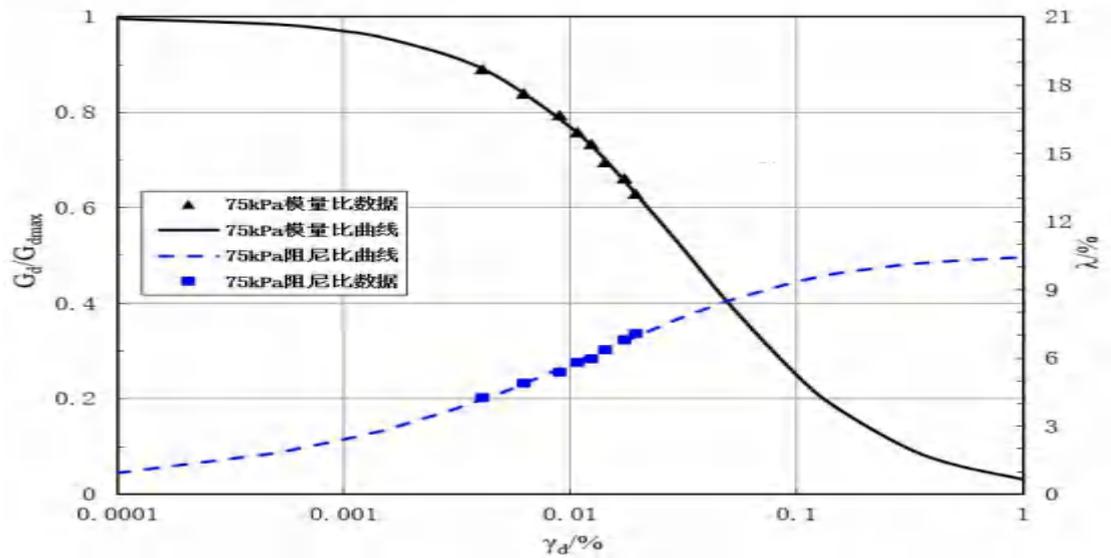
(36) ZK60-4 土样



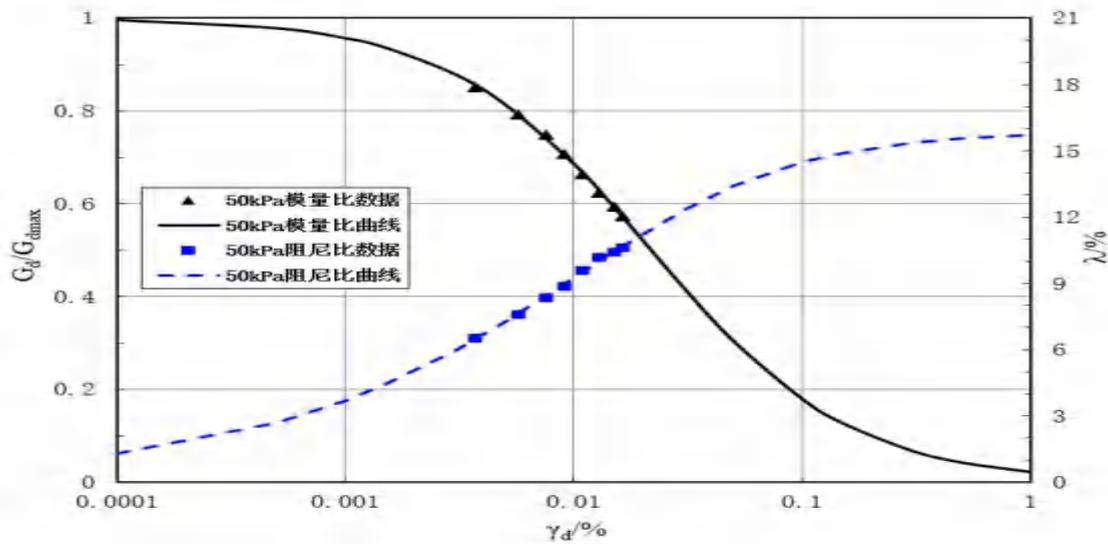
(37) ZK63-1 土样



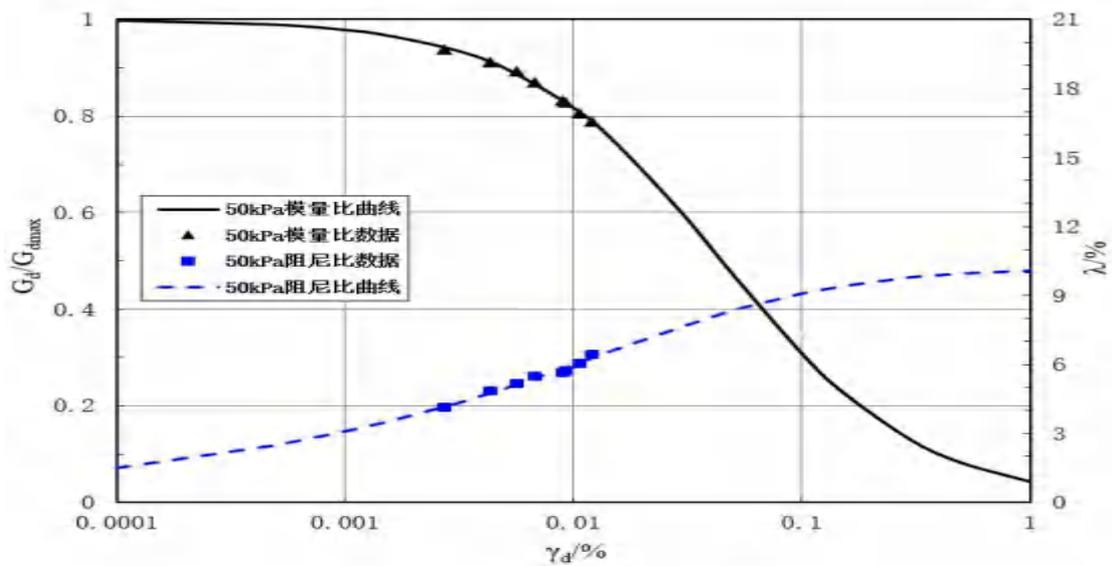
(38) ZK64-2 土样



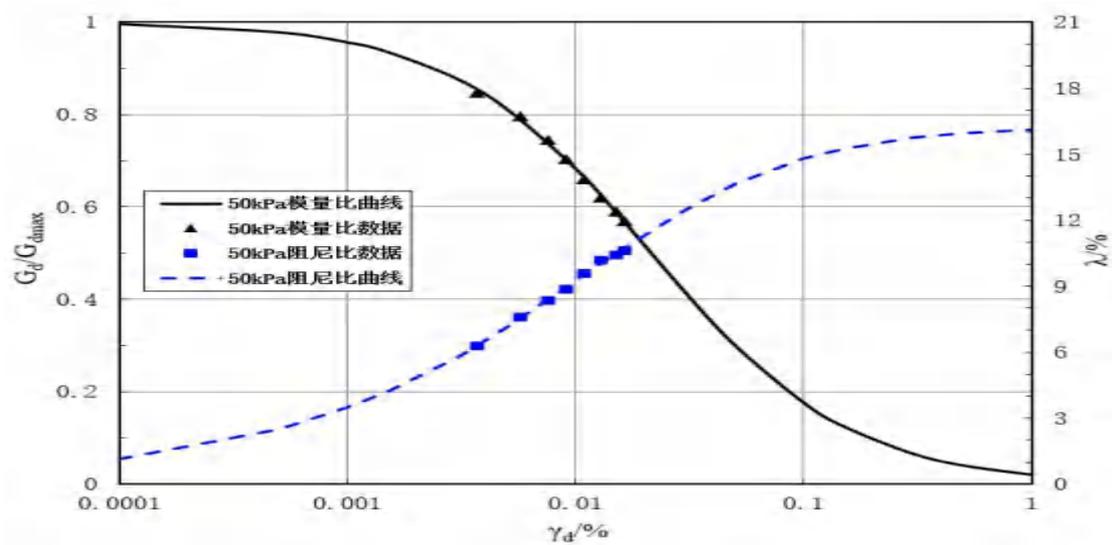
(39) ZK66-2 土样



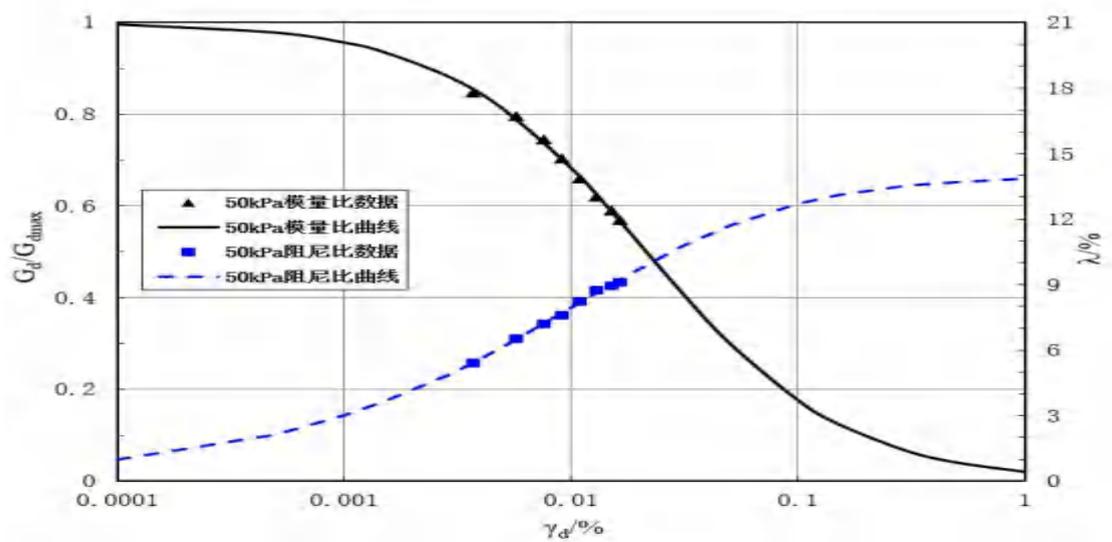
(40) ZK70-1 土样



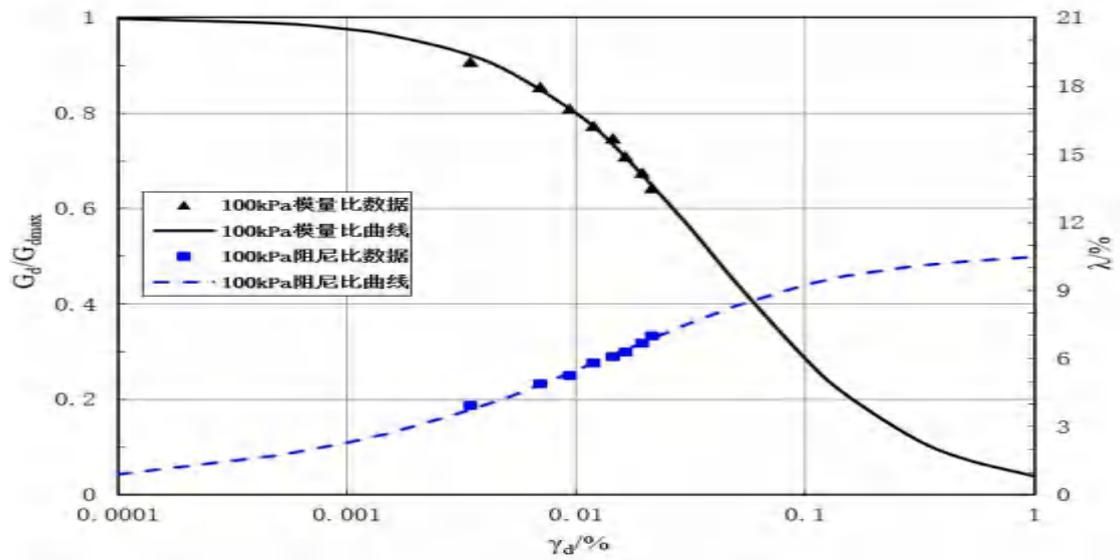
(41) ZK72-1 土样



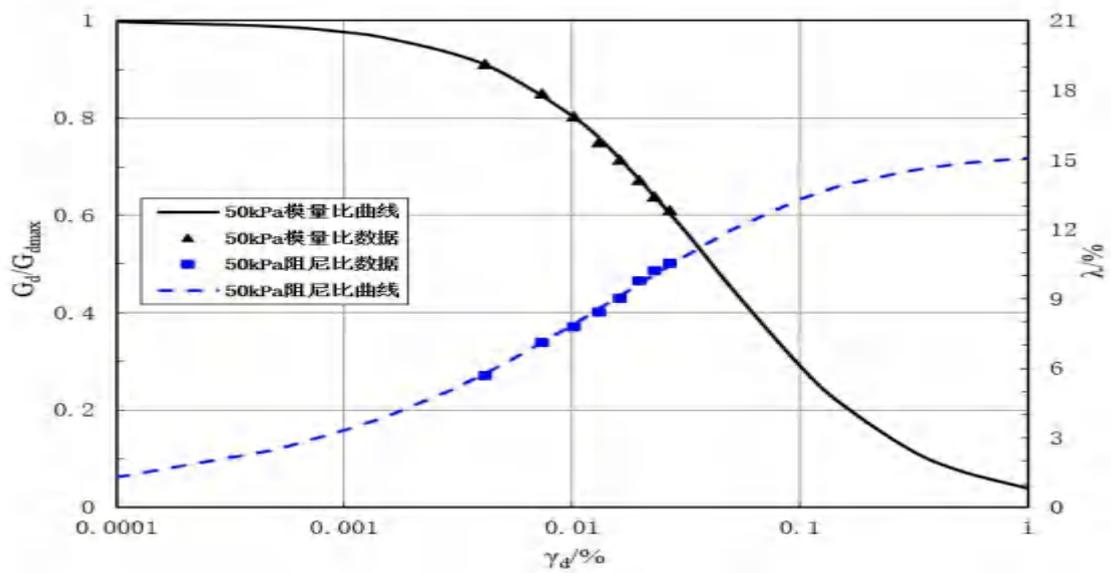
(42) ZK72-2 土样



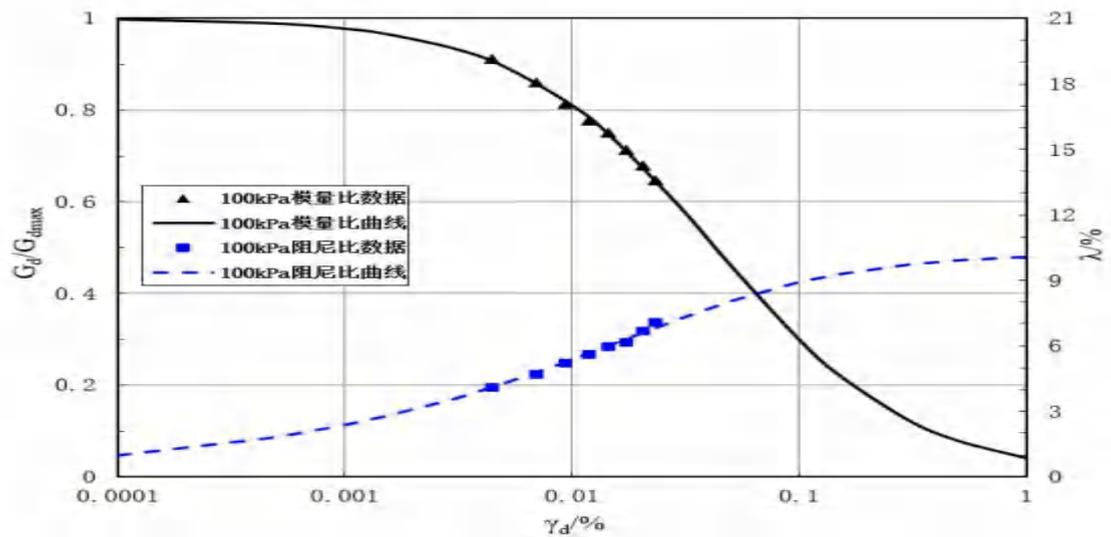
(43) ZK75-1 土样



(44) ZK75-3 土样



(45) ZK76-1 土样



(46) ZK78-2 土样

图 4.3.3 试样土样

#### 4.3.5 场地土土工试验

现场钻探过程中取得 21 个常规土工试验样品，进行了场地土静力参数物理力学指标的试验，实验内容包括：含水率、比重、重度、干重度、液性指数等。其密度值应用于土层地震反应计算模型中（土工试验成果报告表详见附件），样品见表 4.3.4 。





# 土工试验成果表

工程名称：秦皇岛经济技术开发区区域性地震安全评价  
 委托单位：中冶地勘岩土工程有限责任公司

收样日期：2021年8月2日  
 成果提出日期：2021年8月2日

土样编号	取土深度 m	物理性指标									力学性指标				颗粒级配 B% (mm)								细颗粒含水量%	细颗粒液性指数	土按岩土工程勘察规范定名	备注											
		天然含水量	密度	比重	天然孔隙比	饱和度	液限	塑限	塑性指数	液性指数	压缩性		直剪		卵石	圆角砾	砂粒				粉粒	黏粒															
											压缩系数	压缩模量	内摩擦角	黏聚力			粗	中	细	粉																	
																											a <sub>0.1~0.2</sub>	Es	φ	C							
W	ρ <sub>0</sub>	G	e	Sr	W <sub>l</sub>	W <sub>p</sub>	I <sub>p</sub>	II	MPa-1	MPa	度	kPa	>20	20-2.0	2.0-0.5	0.5-0.25	0.25-0.075	<0.075	0.05-0.005	<0.005																	
14-1	2.4	23.4	1.92	2.69	0.729	86.3	28.2	20.2	13.0	0.40	0.310	5.6	23.9	15.1																				粉质粘土			
14-3	8.8	24.9	1.97	2.71	0.718	94.0	33.3	21.3	12.0	0.30	0.250	6.9	17.1	32.1																				粉质粘土			
14-6	14.2															21.1	59.3	14.7	3.7	1.2														粗砂			
14-8	18.0															0.6	67.3	23.8	7.0	1.3														粗砂			
39-1	1.2	23.5	1.96	2.71	0.708	89.9	33.1	21.1	12.0	0.20	0.180	9.5	21.9	65.2																				粉质粘土			

#### 4.4 三维地质结构模型

目标区东西两个区距离较远，跨越不同地貌单元，根据钻孔勘察结合地质雷达勘测结果，目标区在地下 30m 左右出现基岩，基岩上部主要覆盖松散的素填土、粉质粘土、中粗砂以及砂质粘性土，基岩岩性主要为风化的混合花岗岩

根据钻孔勘探结果，结合物探工作结果以及已有地质资料。建立的秦皇岛经济技术开发区浅部沉积层三维地质结构模型见图 4.4.1。目标区浅部沉积层三维地质结构模型切片见图 4.4.2。

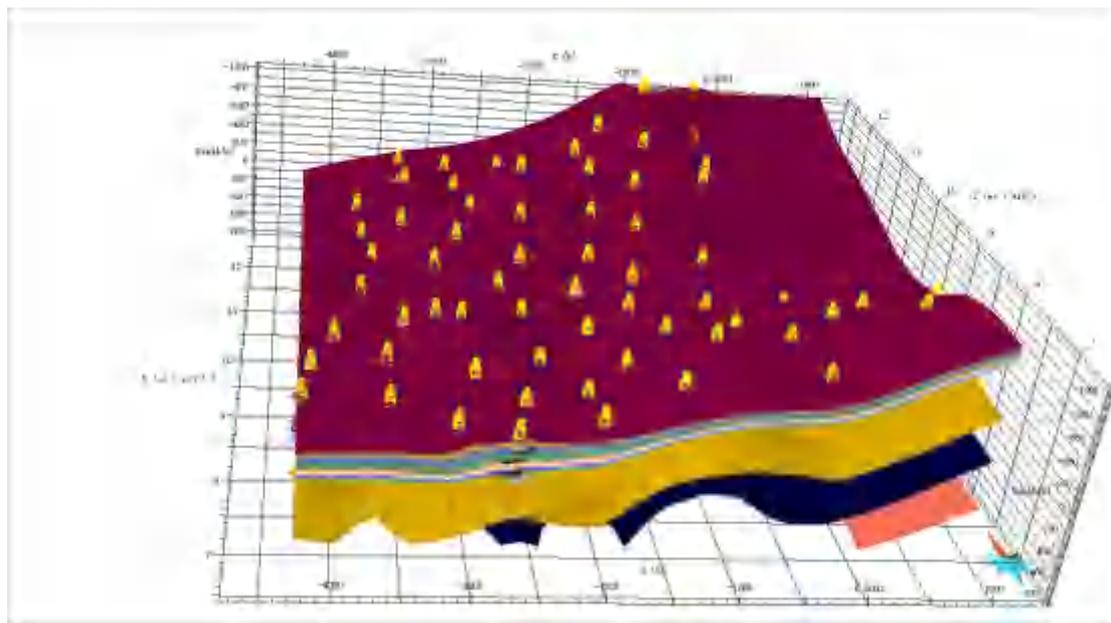


图 4.4.1A 目标区西区浅部沉积层土层结构（垂向放大 20 倍）

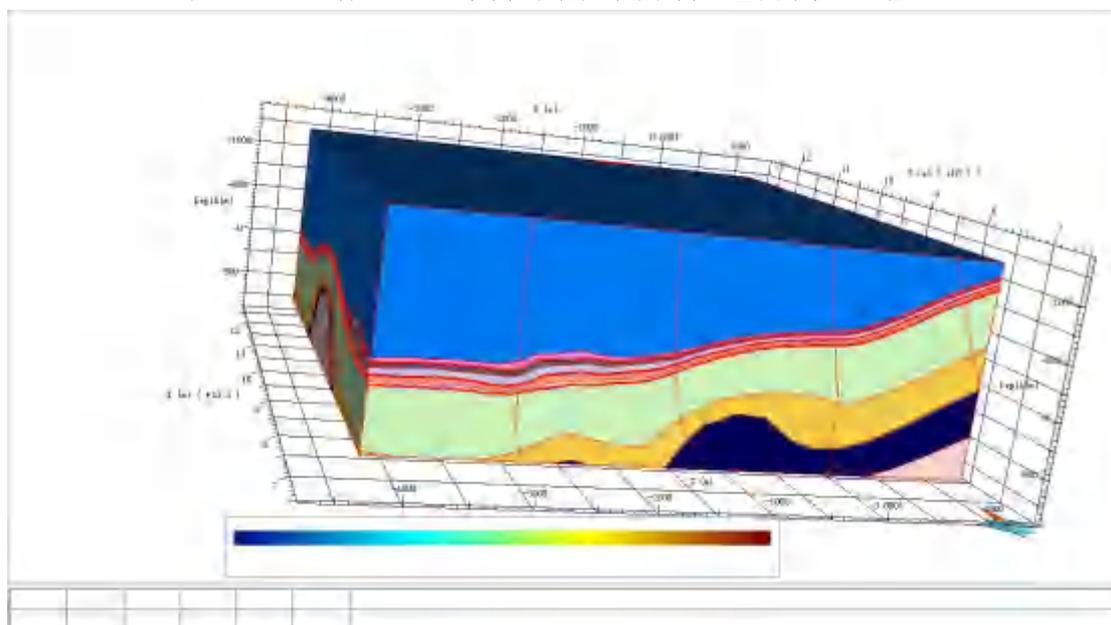


图 4.4.1B 目标区西区浅部沉积层三维地质结构模型（垂向放大 20 倍）

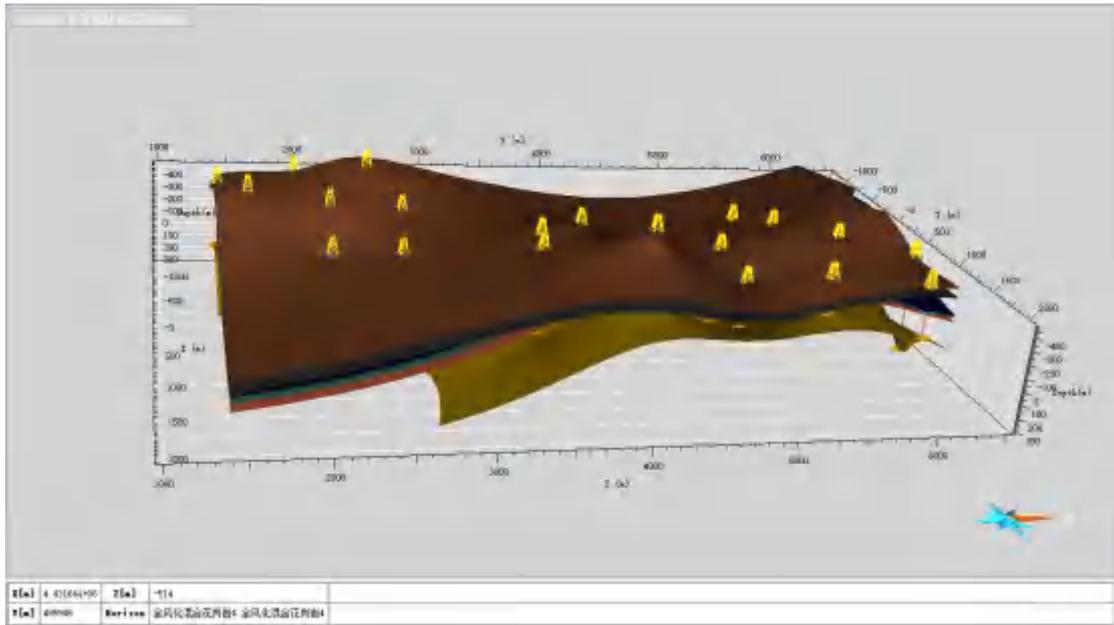


图 4.4.1C 目标区东区浅部沉积层土层结构（垂向放大 20 倍）

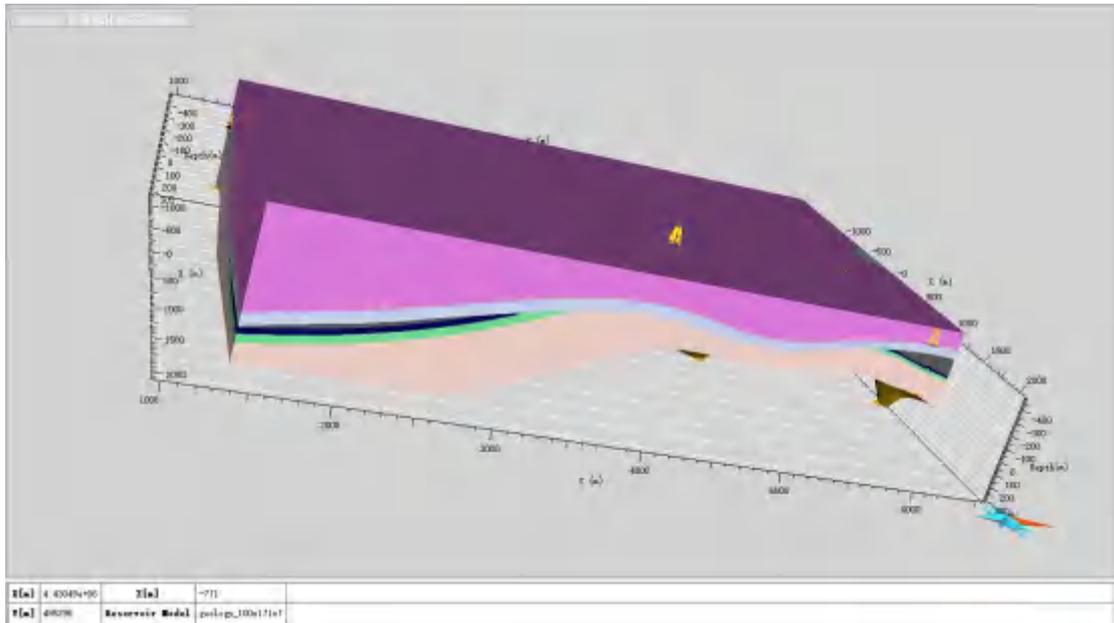


图 4.4.1D 目标区东区浅部沉积层三维地质结构模型（垂向放大 20 倍）

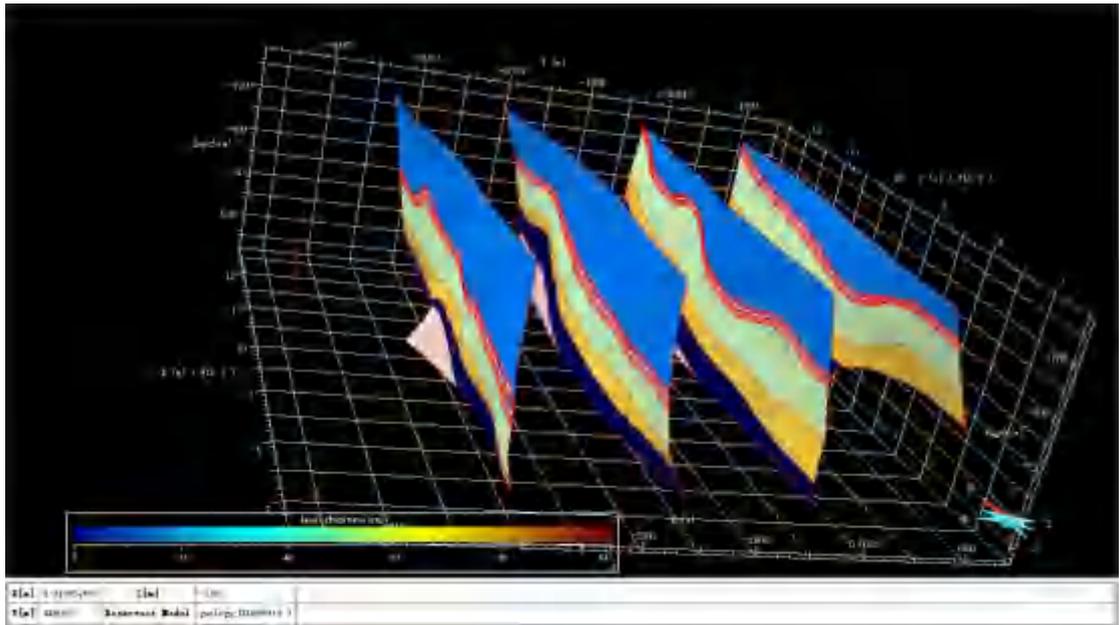


图 4.4.2A 目标区西区浅部沉积层三维地质结构模型南北向切片（垂向放大 20 倍）

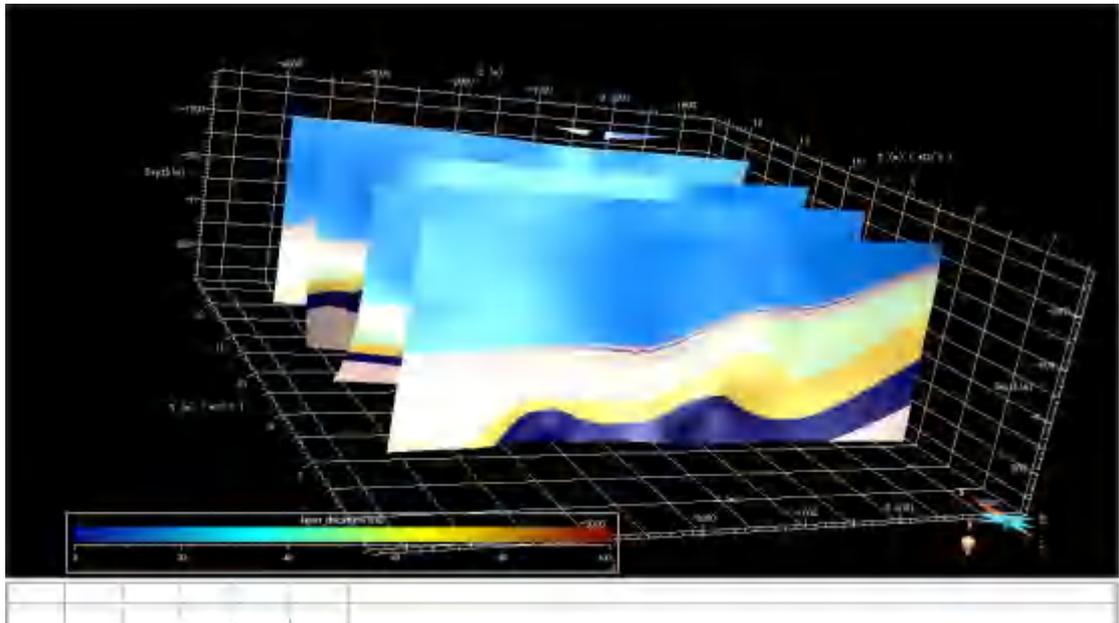


图 4.4.2B 目标区西区浅部沉积层三维地质结构模型东西向切片（垂向放大 20 倍）

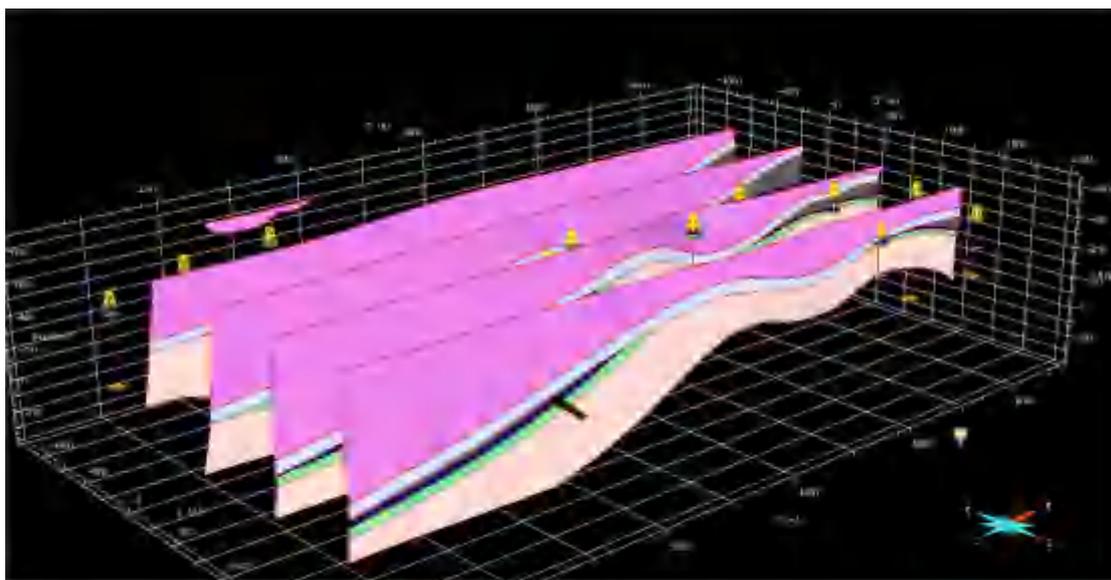


图 4.4.2C 目标区西区浅部沉积层三维地质结构模型东西向切片（垂向放大 20 倍）

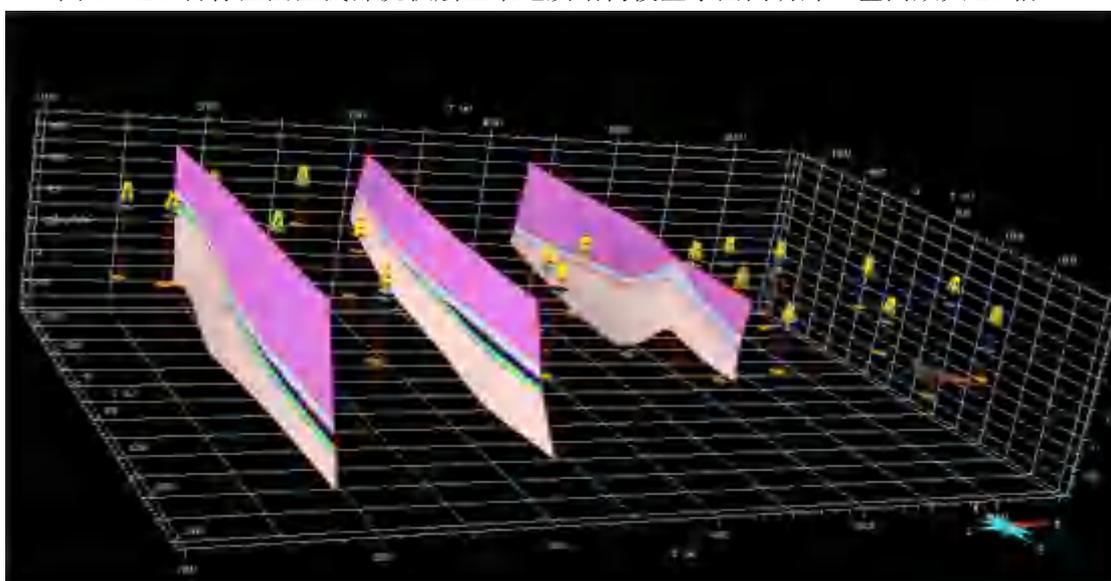


图 4.4.2D 目标区东区浅部沉积层三维地质结构模型南北向切片（垂向放大 20 倍）

## 第五章 地震危险性分析

按《工程场地地震安全性评价》（GB17741-2005）和《河北省区域性地震安全性评价技术细则（试行）》的要求，本章采用地震危险性分析的概率方法对目标区场地进行地震危险性分析计算。工作内容为，依据区域地震活动性和区域地震地质的研究成果，采用地震危险性的概率分析方法，对影响场地地震安全性的潜在震源区、地震活动性参数进行确定，然后采用适用于本地区的地震动衰减关系进行场地的地震危险性分析。

本章节采用《中国地震动峰值加速度区划图》（GB18306-2015）中“三级潜在震源区划分模型”进行潜源划分，其中三级潜在震源区通过空间关系大小与底顶层叠顺序分为地震统计区（地震带）、地震构造区与潜在震源区。

### 5.1 地震危险性概率分析方法概述

地震危险性分析的基本技术思路和计算方法概述如下：

（1）首先确定地震统计单元（地震区、带），并以此作为考虑地震活动时间非均匀性、确定未来百年地震发生的概率模型和地震危险性空间相对分布概率模型的基本单元。对每个统计单元采用分段的泊松过程模型，令  $N$  为统计单元未来  $t$  年内发生地震次数的随机变量，根据泊松过程的基本假定，发生  $n$  次 4 级以上地震的概率为：

$$P(N=n) = \frac{(v_4 t)^n}{n!} e^{-v_4 t} \quad (5.1.1)$$

其中  $v_4$  为 4 级以上地震的年平均发生率。考虑到统计单元地震活动水平的非均匀性，该值通过前面对地震带未来百年地震活动趋势预测结果来得到。

统计单元内地震震级概率密度函数为截断的指数函数：

$$f(m) = \frac{\beta \exp[-\beta(m-m_0)]}{1 - \exp[-\beta(m_{uz}-m_0)]} \quad (5.1.2)$$

其中  $M_{uz}$  为该统计单元的震级上限， $M_0$  为相应单元的震级下限。 $\beta=2.3b$ ， $b$  即地震活动性统计得到的震级频度关系中的  $b$  值。当震级小于震级下限和大于震级上限时，概率密度值为零。

（2）在地震带（统计单元）内部划分潜在震源区。潜在震源区内地震发生的可能性是均匀分布的。潜在震源区由几何边界、震级上限和分震级档的地震空间分布函数  $f_{i,m_j}$  来描述。

（3）利用全概率求和原理计算给定统计单元内发生一次地震时，场点给定地震动值（ $I$ ）超越给定值（ $i$ ）的超越概率，基本计算公式为：

$$P(I \geq i) = \iiint P(I \geq i | E) f(x, y | M) f_M(M) f_{x,y}(\theta) dx dy dM d\theta \quad (5.1.3)$$

其中  $P(I \geq i|E)$  为震级为  $M$ 、震中位置为  $(x, y)$ 、地震动椭圆衰减长轴方向与正东方向夹角为  $\theta$  时，场点给定地震动值 ( $i$ ) 被超过的概率，该函数由地震动衰减关系确定； $f(x, y|M)$  为给定震级的空间分布函数。该函数可以考虑震级分档情况和潜在震源区的面积，由  $f_{i,m_j}$  计算得到； $f_m(M)$  为潜在震源区发生给定震级的概率。 $f_{x,y}(\theta)$  为等震线长轴取向概率密度函数，考虑到空间取向的离散性，实际计算中取两个主要方向，此时该函数用  $\delta$  函数表示。在同一潜在震源区内等震线长轴取向概率密度函数相等，不同的潜在震源区该函数可以不同。

(4) 利用地震发生次数的分段泊松模型，可以计算得到某个统计单元  $k$  对场地的超越概率：

$$P_{ik}(I \geq i) = 1 - e^{-V_4^{iP}(I \geq i)} \quad (5.1.4)$$

(5) 若有  $K$  个统计单元对场地有影响，则场地总的超越概率为：

$$P_f(I \geq i) = 1 - \prod_{k=1}^K [(1 - P_{ik}(I \geq i))] \quad (5.1.5)$$

(6) 采用中国地震局震害防御司推荐的计算程序进行地震危险性分析计算。

## 5.2 地震统计区划分与地震活动性参数

地震统计区系指具有相同的震级—频度关系，并遵从相同的泊松分布模型的区域，即区内具有统一的地震年平均发生率。划分地震统计区的目的是确定地震统计单元，通过它来体现地震活动时空不均一性，是分析地震时空分布特征、估计未来地震活动趋势及地震危险性分析中地震活动参数估计的基本单元。地震统计区的划分，直接影响着目标区地震危险性评价，是概率法主要的基础工作之一。地震统计区的划分方案是依据地震活动空间分布成带性和地震与活动构造带的一致性确定。本报告采用新编《中国地震动参数区划图》的结果。地震带的地震活动性参数主要包括：震级上限  $M_{uz}$ ，起算震级  $M_0$ ，震级—频度关系中的  $b$  值以及地震年平均发生率  $v_4$ 。

### 5.2.1 地震统计区划分

(1) 新构造、现代构造运动性质、强度一致性较好或类似的地带；如以挤压上升为主、以挤压逆冲为主、以断陷为主、以挤压走滑为主的断裂带；

(2) 地震活动性，主要包括地震频度、最大震级、活动周期、古地震和历史地震重复间隔、应变积累释放过程、震源深度等相一致或一致性较好地带等；

(3) 新生代以来构造应力场和地震构造应力场一致性较好地带，构造应力场包括断层节面性质、主压应力轴方位、倾角；

(4) 地震构造类型一致性较好地带，如地震断层性质、方向、破裂长度与震级关系较一致等；

(5) 地球物理场和地壳结构相类似的地带，以及巨大的地壳结构变异带和地球物理场变异带，如重力、磁力梯度带和地热过渡带等；

(6)分带边界:①活动构造带的边界带;②破坏性地震相对密集带的外包带;③区域性深、大断裂活动的影响带;④相邻地带在构造活动或地震活动上有明显差异的分界带;

区域范围所在区域属华北地震区,华北地震区是我国东部大陆地区地震活动最强烈的一个地震区。据潘华研究认为,华北地区地震活动的空间分布特征具有成带性在地震带内地震分布是不均匀的,具有交汇网络特点。地震空间分布着一系列NNE 向的地震带。区域涉及了华北平原地震统计区、郟庐地震统计区和东北地震统计区。

### 5.2.2 地震统计区活动性参数

震级上限Muz的含义是指震级-频度关系式中,累积频度趋于零的震级极限值。确定Muz有两条主要依据:一是历史地震资料足够长的地区,地震带中地震活动已经历几个地震活动期,可按该区内发生过的最大地震强度确定Muz;二是在同一个大地震活动区内,用构造类比外推,认为具有相似构造条件的地震带,可发生相似强度的最大地震。在实际工作中,综合考虑以上两条原则,且遵从地震带(地震统计区)的震级上限Muz应等于区内各潜在震源区震级上限(Mu)的最大值这一原则,即 $Muz = (Mu)_{max}$ 。因此有:

华北平原地震统计区:  $Muz = 8.0$ ; 郟庐地震统计区 $= 8.5$ ; 东北地震统计区:  $Muz = 7.5$ 。

起算震级 $M_0$ 系指对目标区有影响的最小震级,它与震源深度、震源类型、震源应力环境等有关。由于区域范围内地震属浅源地震,一些4级地震也会产生一定程度的破坏,因此将涉及地震带的起算震级 $M_0$ 均定为4.0级。

#### (1) 华北平原地震统计区

华北平原地震统计区为强震活动区,最大地震震级达到8级。该区最早地震记载始于公元前1767年河南偃师6级地震。1484年以前,地震缺失较多,1484年M5级地震记录基本完整,1950年以来4级以上地震记录较全。公元1485年和1791年是两个地震活动相对密集期的开始,未来地震活动水平不应低估长期的平均地震活动水平。表5.2.1给出了华北平原地震统计区不同时段地震发生率的统计。

表5.2.1 华北平原地震统计区不同时段地震年平均发生率

时间段	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0
1484-2010			0.2600	0.1271	0.0531	0.0266	0.0114	0.0057	0.0019
1500-2010			0.2642	0.1311	0.0548	0.0274	0.0117	0.0059	0.0020
1791-2010			0.4227	0.1727	0.0818	0.0409	0.0227	0.0091	0.0000
1950-2010	4.9661	1.7797	0.6949	0.1864	0.1186	0.0508			

根据该地震统计区地震活动特征与实际资料状况，确定了41个统计方案，对其计算结果统计列于表5.2.2中。经调整，确定华北平原地震统计区地震活动性参数为 $b=0.86$ ， $V_4=4.6$ 。图5.2.1给出了理论计算值与实际统计数据点的比较，结果可以看出，所得 $b$ 与 $V_4$ 参数计算得到的理论发生率在小震级段，与1950年以来的水平大致相当；在中强震级段与1791年以来的平均地震活动水平相当，该活动期以中强地震活动为主要特征；而在高震级段，以1484年以来的发生率控制。

表5.2.2 华北平原地震统计区 $b$ 与 $V_4$ 统计结果

	$b$	$V_4$
均值	0.768	2.87
中值	0.726	3.39
标准差	0.114	1.11
85分位值	0.862	3.89
75分位值	0.817	3.66
泊松分布拟合		3.77

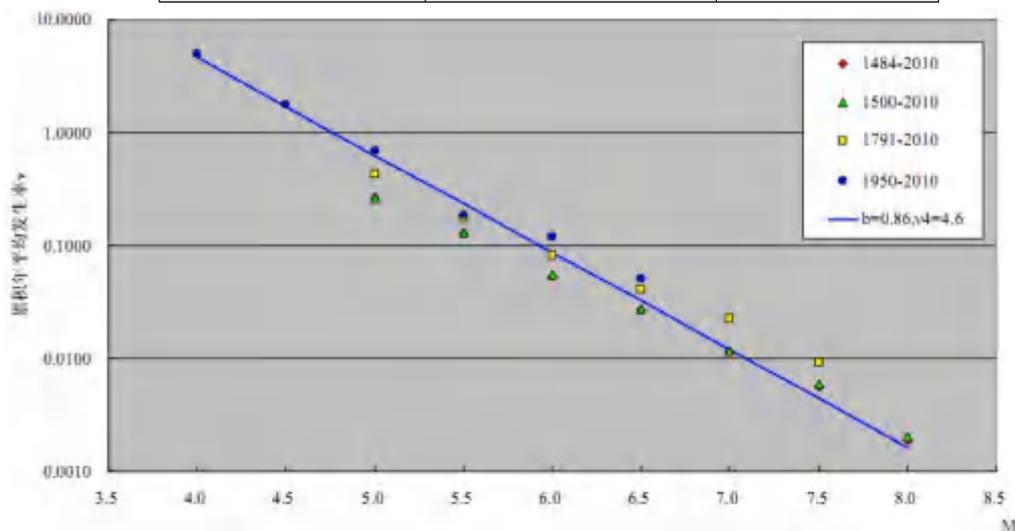


图5.2.1 华北平原地震统计区各时段实际统计与理论结果对比

## (2) 郟庐地震统计区

郟庐地震带1500年之前地震缺失较多，1500年后5级以上地震记录才基本完整， $M \geq 5$ 级地震发生较为平稳，1970年以来4级以上地震记录较全，1477年和1829年是两个地震活动相对密集期的开始，未来地震活动水平不应低估活跃期水平。由于不同时段不同震级的地震记录完整性差异较大，为了更合理的利用各时段的资料，采用分时段、分震级联合统计的方法计算 $b$ 值。利用1970年~2010年的小震（ $M_{S}4.0-5.4$ ）、1892年~2010年的中强震（ $M_{S}6.0-7.9$ ）和1500年~2010年的大震（ $M_{S}8.0$ ）联合计算震级一年发生率关系式，见表5.2.3和图5.2.2，得到 $a=3.89$ ， $b=0.85$ ， $v_4=4.0$ 。

表 5.2.3 郟庐地震带分时段累计地震年平均发生率

时间段	$M_{S} \geq 4.0$	$M_{S} \geq 4.5$	$M_{S} \geq 5.0$	$M_{S} \geq 5.5$	$M_{S} \geq 6.0$	$M_{S} \geq 6.5$	$M_{S} \geq 7.0$	$M_{S} \geq 7.5$	$M_{S} \geq 8.0$
-----	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------

1484—2010			0.1498	0.0805	0.0393	0.0169	0.0112	0.0037	0.0019
1500—2010			0.1507	0.0802	0.0391	0.0176	0.0117	0.0039	0.002
1892—2010			0.2253	0.1209	0.0659	0.0275	0.0165	0.0055	
1970—2010	7.2683	1.6829	0.3171	0.0976	0.0244	0.0244			
联合	7.2683	1.6829	0.3171	0.1209	0.0659	0.0275	0.0165	0.0055	0.002

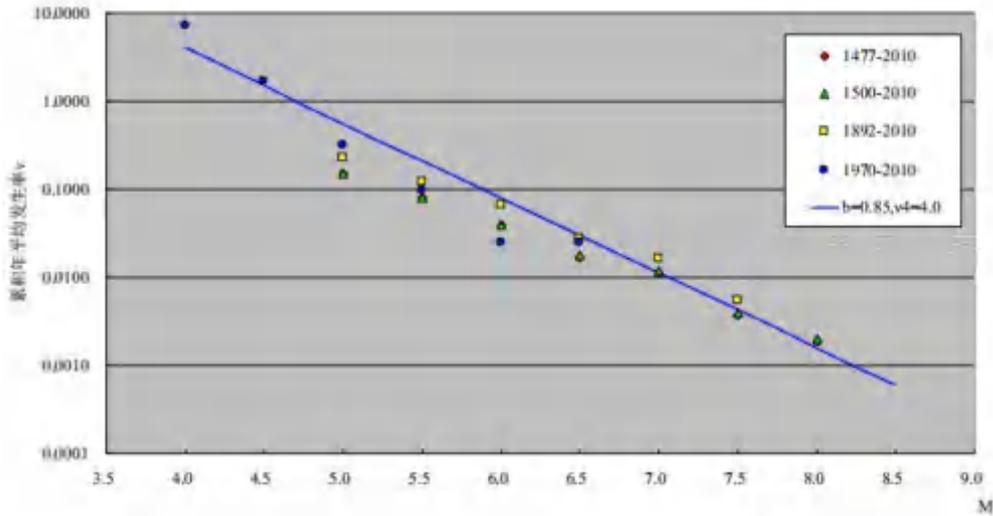


图 5.2.2 郟庐地震带 b 值拟合曲线

### (3) 东北地震统计区

东北地震统计区浅源地震活动较弱，以中等强度地震活动为主要特征，最大地震为 6 级。该区最早的地震记载始于公元 419 年，1920 年之前地震资料缺失严重，自 1920 年以来  $M \geq 5.0$  级地震比较完整，1970 年以后  $M \geq 4.0$  级地震记录较全。东北地震统计区自 1920 年以来地震活动一直较为平稳，未来该区地震活动水平应不低估自 1920 年以来的平均活动水平。东北地震统计区地震资料缺失严重，且记录到的震级没有超过 7 级，因此，近代地震记录对  $v_4$  与  $b$  值调整非常重要。对  $v_4$  与  $b$  值调整重点考虑以下控制： $M \geq 4.0$  级地震年发生率应大致相当 1970 年以来地震活动水平； $M \geq 5.0$  级地震年发生率应不低于 1920 年以来地震活动水平； $M 6$  级左右强震发生率应重点考虑 1900 年以来地震活动情况；经调整，确定东北地震统计区地震活动性参数为  $b=1.0$ ， $v_4=5.0$ 。图 5.2.3 给出了理论计算值与实际统计数据点的比较，结果可以看出，所得  $b$ 、 $v_4$  参数计算得到的理论发生率在小震级段和中强震级段，均不低于 1920 年、1970 年以来的活动水平；在强震级段比 1900 年以来的地震活动水平略保守，考虑到东北地震统计区内划分了较多 7 级以上潜在震源区，且缺乏 7 级以上地震记录，总体地震记载时间也短，因此，适当在强震段取略保守的结果是可以接受的。

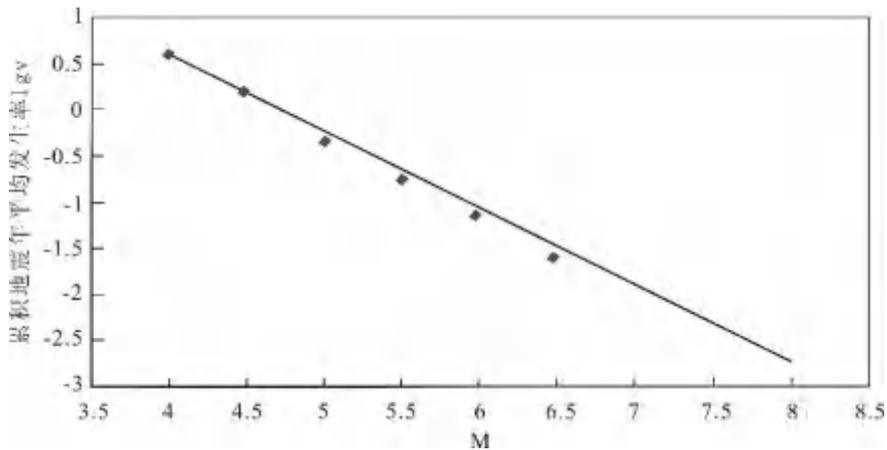


图 5.2.3 东北地震统计区 b 值拟合曲线

各个地震统计区的地震活动性参数，见表5.2.4。

表5.2.4 地震统计区地震活动性参数表

地震统计区名称	震级上限 $M_{UZ}$	震级下限 $M_0$	b 值	年平均发生率 $v_4(MS \geq 4.0)$
华北平原地震统计区	8.0	4	0.86	4.6
郟庐地震统计区	8.5	4	0.85	4.0
东北地震统计区	7.5	4	1.0	5.0

### 5.3 地震构造区及潜在震源区的划分

地震构造区是指在现今地球动力学环境下，地震构造环境和发震构造模型一致的地区。地震构造环境一致是指在统一的现今地球动力学环境、新构造活动特点、构造应力场及深部地球物理场等条件下，发震构造模型具有一致性或相似性的特点。地震构造区内与发震构造模型不相关、随机发生的地震为背景性地震。地震构造区通过边界、背景地震震级、背景地震频度及其大小地震的比例关系来描述，其中背景地震是指地震构造区内与已鉴定出的发震构造不相关的最大潜在地震。

潜在震源区定义为“未来可能发生破坏性地震的震源所在地区”，包括潜在震源区的识别和确定其地震的主要破裂方向、位置、范围、震级上限和各震级档的地震年发生率。潜在震源区是地震活动性的分配单元，是在划分地震带的基础上进一步确定具有相同地震发生的可能性和相同震级上限的发震构造范围。潜在震源区划分起到连接地震、地质和地球物理基础数据与地震危险性分析之间桥梁的作用。

#### 5.3.1 地震构造区的划分

为更好的控制地震活动时空非均匀性，根据国家第五代地震动参数区划图划分原则，为加强抗震设防，增加地震构造区的划分方案，以反映整个地区构造形式的一致性，以及构造类型和具体构造细节的不一致。在GB 18306—2015的地震区、带划分方案基础上，根据新资料和认识，修订中国及邻区地震区、带划分

方案。分析地震区、带内不同区域的背景地震活动性差异及地震构造背景差别，划分出不同的地震构造区。

地震构造区通过边界、背景地震震级、背景地震频度及其大小地震的比例关系来描述，其中背景地震是指地震构造区内与已鉴定出的发震构造不相关的最大潜在地震。

确定背景地震震级时既要考虑地震构造区内与发震构造不相关的历史地震大小，也要结合构造活动环境与地震活动特点，采用构造类比的方法综合评定。

背景地震震级一般大于区内与发震构造不相关的最大历史地震震级，二者也有相等的情况。

地震构造区划分原则：

1) 区别出地震带内发震构造模型不同的地区，以利于构造类比判定潜在震源区。

2) 区别出地震带内背景地震不同的地区。

3) 同一地震带内背景地震相同的地区，但背景地震年发生频度（或年发生率）有差别。

4) 划分地震构造区需要考虑构造活动性与研究程度的差异，对于研究程度较低的西部地区，尤其是资料缺乏地区，地震构造区的范围可大一些，相应背景地震应考虑不确定性评定得偏高一些。

地震构造区划分方法：

1) 通过区域新构造运动特征研究，依据不同地区新构造整体特征差异，结合布格重力异常、均衡重力异常等地球物理场差异，划分出不同特征的新构造分区，作为划分地震构造区的基础。

2) 通过区域第四纪以来构造活动带，特别是第四纪主要断裂活动性的分析研究，结合地震活动资料，进行第四纪构造活动分区，作为划分地震构造区最为直接的依据。

3) 通过分析第四纪以来尤其是晚第四纪以来构造变形样式，区分出不同构造变形样式的地区，作为进一步划分地震构造区的依据。

4) 分析强震及其以上（地震活动性较强地区）或中强地震及其以上（地震活动性较低地区）的发震构造条件，甄别出发震构造带及其与发震构造相关的最低地震震级，作为评价地震构造区背景地震的构造排除法依据。

5) 通过地震活动的统计分析，结合构造活动强度的类比，作为确定背景地震大小的地震活动性依据。

### 5.3.2 潜在震源区的划分

潜在震源区划分是地震危险性分析的重要步骤，它是在研究区域内确定未来潜在发生破坏性地震的区域。潜在震源区划分是在前述区域、近区域的地震活动性、地震构造研究成果的基础上，按一定的原则和方法，划分出可能发生强震的分布区域和潜在地震的最大强度及有关参数。

潜在震源区划分包括三个要素的确定，即范围（边界）、破裂方向和震级上

限。

### (1) 潜在震源区划分的原则和方法

潜在震源区划分的原则：

1) 潜在震源区划分在地震构造区内进行，其边界不跨越地震构造区的边界。  
2) 仍沿用历史地震重复与构造类比两个原则，其中构造类比原则的内涵有进一步的深化，即考虑断裂带所处不同级别活动块体边界带的差异、发震构造模型差异等因素。

3) 在强地震活动区，高震级潜在震源区的划分需要考虑地震构造区的发震构造模型的支撑；而在弱地震活动区，中强潜在震源区的划分需要考虑地震构造区中地震构造样式的约束。

潜在震源区划分方法：

1) 历史上发生过大地震的地方，将来还可能发生类似的地震。在地震危险性分析中，历史地震的地点和强度是估计未来震源区的重要依据之一。此外，还需研究近期的地震活动性，通过近期强震活动以及与其相关的小震活动图像特征分析，以增加判定潜在震源区的依据。

2) 根据已发生强震的地区发震构造条件的研究，外推到具有相同或类似构造条件的区域。需要指出，大地震并不是在深和大的构造带上均匀发生，而只在某些具有特定发震构造条件的部位或地段发生，这就是强震活动的空间不均匀性。因此，深入研究大地震发生的构造条件，以及各活动断裂（带）的分段性，是划分潜在震源区的重要基础。

3) 在基于发震构造模型分析强震发生的构造条件基础上，采用潜在震源区系统划分法。考虑发震构造模型的平面组合样式、变形强度、深浅构造关系及其对不同震级档地震的控制能力。

4) 采用基于新构造以来地震构造环境样式与强弱的总体分析与定位、发震构造条带识别与分段、不同段落潜在发震能力的判别、历史地震与仪器记录中小地震活动特征分析等途径来划分潜在震源区的方法，更有利于中强地震区对区域性潜在震源区分布带的合理把握。

5) 潜在震源区的范围应包括潜在地震的可能平面分布区域，因此沿不同性质或相同性质但深、浅构造样式有差别的地震构造划分潜在震源区时，潜在震源区边界并不沿地表构造两侧对称勾画。

6) 潜在震源区的震级上限一般高于已发生的历史地震震级，对于高震级的潜在震源区（尤其是震级上限 8.0 级或以上），如果结合构造类比判断其震级大小不大可能突破该历史地震震级，震级上限可取历史地震最大震级。

7) 潜在震源区方向一般为发震构造方向。

### (2) 判断潜在震源区的标志

1) 地震地质标志

①活动断裂标志：强烈活动的主干断裂或深大断裂本身就是地震活动带。但是，地震并不是在活动断裂的任何部位都能发生，而只是在一些特殊的构造部位

才能发生，如不同方向的活动断裂带的交汇复合部位，活动断裂的拐弯处和强烈活动的闭锁段以及端部。

②新生代盆地标志：断陷盆地与地震活动有较好的一致性，拗陷的周围、断陷盆地的端部，尤其是多角盆地顶角部位和盆地内两组活动断裂的交汇部位都是中强地震发生的有利部位。

③新构造运动标志：新构造运动时期升降运动强烈的地带往往是地震活动带。

④地壳形变标志：地壳形变幅度大，速率线密集，差异运动明显的地区强震较多。在较长的时期内地壳形变总趋势稳定的地区与不同形变带相交的地区，特别是形变梯级带发生畸变，转弯和扭曲部位是地震易发生的部位。

## 2)地球物理场和深部构造标志

①地球物理场标志：重、磁异常梯级带，不同方向重、磁异常梯级带相交部位或区域重、磁异常梯度带与其它方向次级异常的交汇部位；重、磁异常发生转折或畸变的部位；高磁异常区中心，负异常交替的线性异常或局部异常相交处和磁异常发生急剧变化的地方。地热场中热区向冷区过渡的地带。

②深部构造标志：强震多发生在地壳厚度的变化带，即莫氏面的陡坡上；莫氏面的斜坡带的扭曲部位和波状起伏的拐点附近；上地幔高导层隆起的边缘地带等都是地震易发的地方。

## 3)地震活动标志

①历史上发生过强地震地区。

②地震网络的结点。

③小地震活动与现代构造一致的地区。

④强震的余震区和现今中小地震的密集区(带)或地震活动性标志(频度、活动度等)所揭示的历史上和现代地震活动水平相对高的区域。

⑤地震活动有特征性图像的地区包括地震围空区和较大地震条带上的空段。

## (3)潜在震源区震级上限确定的依据

潜在震源区的震级上限是指该潜在震源区发生概率趋于 0 的极限地震的震级，通常与潜在震源区一并确定。震级上限按 0.5 个震级单位为间隔确定，如 5.5, 6.0, 6.5, 7.0, 7.5, 8.0 和 8.5 级等几个震级段。

潜在震源区是指未来具有发生破坏性地震潜在可能性的地区。潜在震源区震级上限相当于该潜在震源区内发震构造的最大潜在地震。据此，潜在震源区震级上限的确定将综合考虑下列两项依据。

### 1)地震活动性依据

历史地震资料给出了各地区曾发生过的地震记载情况，其最大震级可能并不足以表示未来可能发生的最大地震的震级。一般情况下，各潜在震源区的震级上限不应低于区内最大历史地震的震级。对于已有历史地震记载的潜在震源区，若历史地震记载时间悠久并资料比较充分，可以将历史上发生的最大地震的震级作为震级上限。在资料不完整的地区，则根据历史地震记载及该区地震构造分析的结果，将历史地震的最大震级加半级作为震级上限。在有古地震资料的地方，古

地震的强度也应是确定潜在震源区震级上限的依据之一。

## 2)地震构造依据

根据目前我国地震研究的状况,确定发震构造的最大潜在地震时,主要考虑活动断层的方向和性质,以及构造规模对该断层上发生地震的最大震级的控制作用。

## 3)潜在震源区震级上限的综合评定

本报告在确定潜在震源区震级上限时,不是以某一个条件作为依据,也不是采用个别震例简单的构造对比,而是综合考虑潜在震源区内地震活动的状况、地震发生的构造环境、现代构造应力场作用下的发震断层的活动性质和活动性,以及发震构造的规模等因素。对于每一方面的依据,都是采用大量数据的统计结果,作为构造对比的依据。

### (4)潜在震源区边界的确定

#### 1)高震级(包括上限8.5级、8级、7.5级和7.0级)潜在震源区

在确定潜在震源区范围时,考虑到高震级的潜在震源区的发震构造条件较为明确,地震多发生在一些特殊构造部位,因此对于构造条件较为明确、发震构造较清楚的高震级潜在震源区应尽可能划小,勾划出震中可能的分布范围,以突出大地震活动空间不均匀性的特点,减少由于高震级档潜在震源区过大引起的平均稀释效应。这类潜在震源区宽度一般为15~20km。对于发震构造由两条以上发震断裂平行分布的高震级档潜源,可适当划大一些,宽度一般20~30km。

#### 2)低震级(上限6.5级及6.0级)潜在震源区

对于发震构造条件不十分清楚、空间分布不确定性因素较大、发生过6.5级以下地震的较低震级地震的潜在震源区,该潜在震源区适当划大或划多一些,以适应当前对这类地震的认识水平和进行不确定性分析。

### (5)潜在震源区的划分结果

根据区域地震构造特征和地震活动特征的分析,以及各级地震发震构造条件的研究结果,按上述潜在震源区划分的原则和方法,结合本区域及近场区地震构造、地震活动环境的研究成果,同时采用最新的区划研究成果,对目标区影响较大的潜在震源区进行了复核与修定。该研究区内共确定出6级以上潜在震源区36个,这些潜在震源区大多数位于华北平原地震带上(见图5.3.1,表5.3.1)。对目标区影响较大的潜在震源区描述如下:

该目标区所在区域共有1个背景源,此背景源为包括昌黎6.0级、唐海6.5级、塘沽7.0级、大港6.5级潜在震源区的地震构造区,震级上限为5.5级。

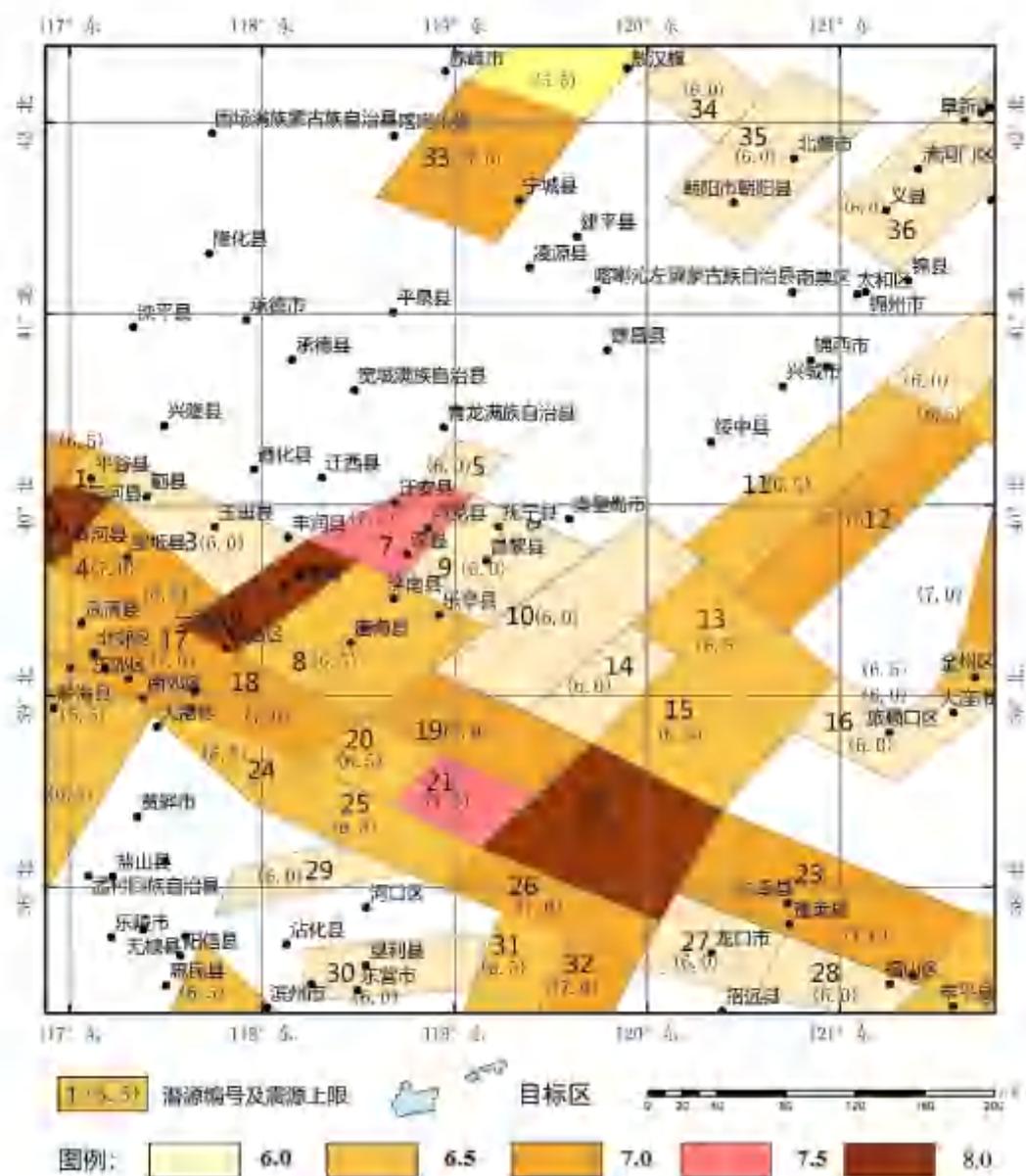


图 5.3.1a 区域及邻近地区潜在震源区划分图

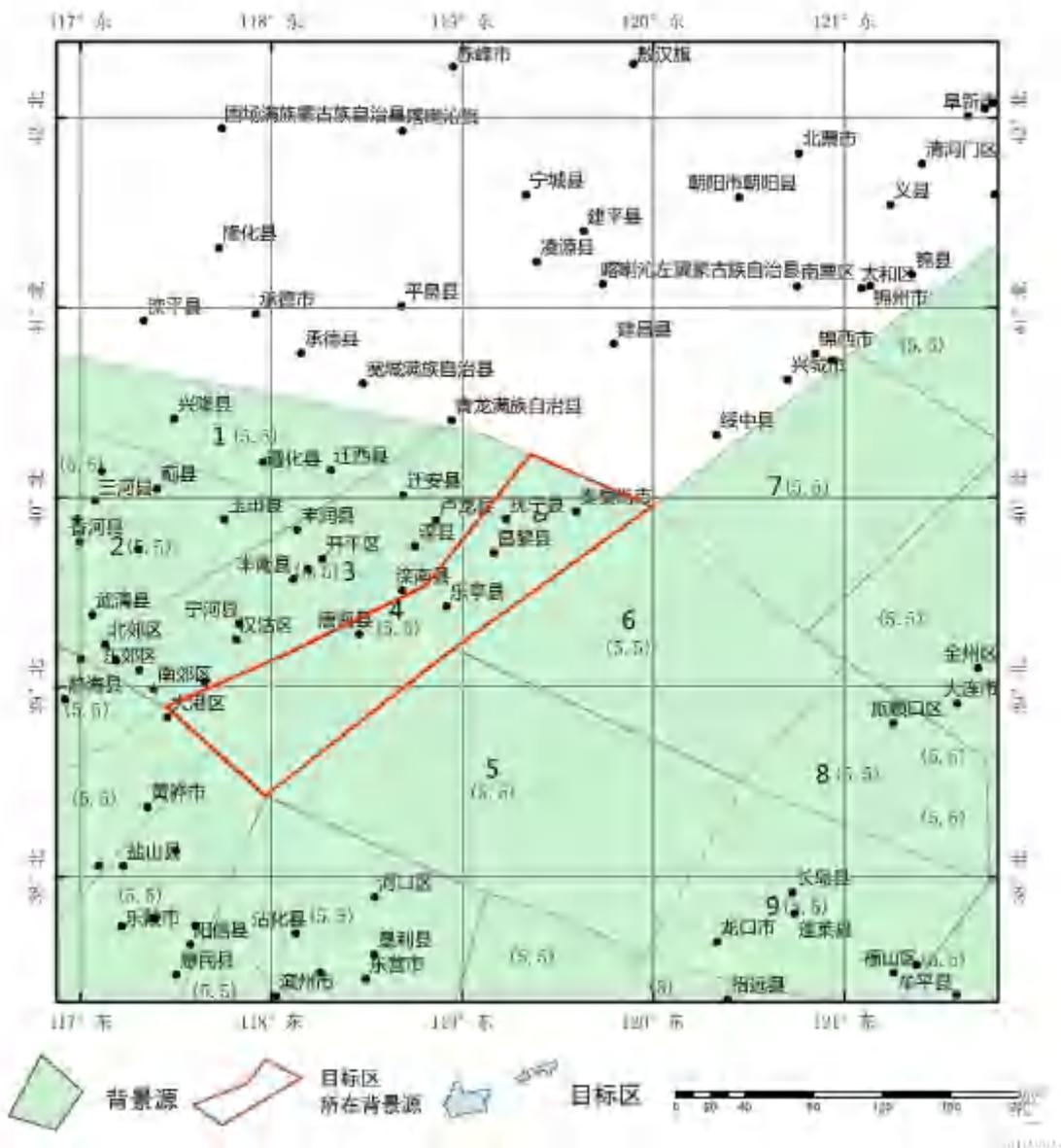


图 5.3.1b 区域及邻近地区背景震源区划分图

表 5.3.1 区域主要潜在震源区划分表

地震带	编号	潜在震源区名称	震级上限	划分依据
	1	平谷潜在震源区	6.5	位于马坊-夏垫强震发震构造带北段，为全新世活动断裂。潜震区中分布有北东向夏垫断裂的三条分支断裂大官庄断裂、大兴庄断裂和程各庄断裂。现代小震活动频繁，最大地震为 ML3.5 级。根据上述特征，综合判定该潜在震源区的震级上限为 6.5 级。
	2	三河震源区	8.0	该区为新生代差异运动强烈的地区，夏垫断裂北段控制了大厂凹陷的发育。历史上 1536 年通县南 6 级地震和 1679 年三河-平

华北平原地震统计区				谷 8 级地震沿该断裂发生。现代小震活动频繁，1970 年以后的仪器记录地震有 67 次，最大地震为 ML4.5 级。依照上述特征，可将本潜在震源区的震级上限定为 8.0 级。
	3	玉田潜在震源区	6.0	位于北西向渤海-张家口强震带活动的影响区中。区内分布有北北东向丰台—野鸡坨第四纪活动断裂。历史上发生了 3 次 5 级以上地震，最大地震为 1626 年天津蓟县 5.5 级地震；现代小震活动频繁，1970 年以后的仪器记录地震有 64 次，最大地震为 ML4.1 级。据上述特征，将其震级上限定为 6.0 级。
	4	宝坻潜在震源区	7.0	沿北西向蓟运河断裂划分，该断裂系晚第四纪活动断裂，并且有北东东向香河-宝坻第四纪活动断裂与之相交汇。历史上发生了两次破坏性地震，最大地震为 1632 年北京通县东南 5 级地震。区内中小地震密集成带，呈北西向展布。1970 年以后的仪器记录地震有 239 次，最大地震为 ML5.8 级。综合上述条件，将其震级上限定为 7.0 级。
	5	滦县北潜在震源区	6.0	沿多条断裂交汇区划分，这些断裂均在第四纪早期活动过，1481 年在河北卢龙东北发生了 5.0 级地震，现代小震活动频繁。1970 年以后的仪器记录地震有 27 次，最大地震为 ML4.2 级。将震级上限定为 6.0 级。
	6	唐山潜在震源区	8.0	沿北东向唐山-河间-磁县断裂带与北西向蓟运河断裂的交汇部位划分，唐山断裂为晚更新世全新世活动断层，蓟运河断裂为全新世活动断裂，1976 年在该区发生了 7.8 级地震，余震密集成带。1970 年以后的仪器记录地震有 1503 次。综合上述特征，将其震级上限定为 8.0 级。
	7	滦县潜在震源区	7.5	沿北东向唐山断裂、北北西向滦县-乐亭断裂、北北东向卢龙断裂交汇部位划分，唐山断裂、滦县-乐亭断裂为全新世活动断裂，卢龙断裂为晚更新世活动断裂。历史上发生 4.7 级以上地震 23 次，最大地震为 1976 年 7.1 级地震。1970 年以后的仪器记录地震有 1806 次，最大地震为 ML5.9 级。将震级上限定为 7.5 级。
	8	唐海潜在震源区	6.5	区内发育北东向宁河-昌黎断裂与北西向柏各庄断裂，这两条断裂第四纪初期有一定的活动性。历史上发生过中强地震，最大

				地震为 1624 年滦县 $6\frac{1}{2}$ 级地震。现代小震活动较多。将其震级上限定为 6.5 级。
	9	昌黎潜在震源区	6.0	沿北东向昌黎断裂和北西向建昌营断裂划分，这两条断裂第四纪早期有过活动，历史上发生 4.7 级以上地震 4 次，最大地震为 1945 年滦县 $6\frac{1}{4}$ 级地震。现代小震活动密集成带。1970 年以后的仪器记录地震有 178 次，最大地震为 ML5.3 级。根据上述特征，将其震级上限定为 6.0 级。
	17	天津潜在震源区	7.0	沿北北东向沧东断裂、天津断裂和北西向海河断裂交汇区划分，地壳深部处于上地幔、莫霍面隆起的边缘部位，。前两条断裂新近纪以来沧东断裂活动显著减弱，海河断裂的西段和东段为晚更新世活动断裂，中段为第四纪早期活动断裂。历史上发生 4.7 级以上地震 7 次，最大地震为 Ms6.2 级。现代小震活动密集成带，1970 年以后的仪器记录地震有 131 次，最大地震为 ML5.7 级。根据上述特征，将其震级上限定为 7.0 级。
	18	塘沽潜在震源区	7.0	沿海河断裂东段划分，为全新世活动断裂，区内曾发生过 5.5 级地震。现代小震活动频繁，1970 年以后的仪器记录地震有 29 次，最大地震为 ML5.8 级。根据上述特征，将其震级上限定为 7.0 级。
郟庐地震统计区	10	秦北潜在震源区	6.0	主体沿秦北断裂划分，呈北东向，区内发育石臼坨断裂、渤海 2 号断裂、旅大断裂等，区内没有 5 级以上历史地震，现代小震活动频繁。考虑到南部沙北潜源的影响，震级上限定为 6.0 级。
	11	辽西 1 号潜在震源区	6.5	沿辽西 1 号断裂划分，为早、中更新世活动断裂，历史上未发生破坏性地震，现代小震分布零星。将其震级上限定为 6.5 级。
	12	辽东潜在震源区	7.0	沿辽东断裂划分，为晚更新世活动断裂，历史上未发生破坏性地震，现代小震分布零星。依据构造类比原则，震级上限确定为 7.0 级。
	13	辽东湾南潜在震源区	6.5	沿渤中断陷和下辽河断陷交界部位划分，呈北西向。区内北东向渤中 1 号、渤东 1 号等断裂与北西向断裂交汇，北东向断裂为晚更新世以来活动断裂。区内曾发生

				1922年 $6\frac{1}{2}$ 级地震。现代小震活动频繁，最大地震为ML4.0级。综合区内上述特征，将其震级上限定为6.5级。
14	秦南潜在震源区	6.0		主体沿秦北断裂划分，呈北东向，该断裂为早中更新世断裂，区内没有5级以上历史地震，现代小震活动频繁，1970年以后的仪器记录地震有64次，最大地震为ML4.8级。考虑到南部沙北潜源的影响，震级上限定为6.0级。
15	渤东潜在震源区	6.5		主体包括渤中1号南段、蓬莱1号断裂、庙西1号、2号断裂。均在晚更新世活动明显。现代小震密集成带。根据地震构造类比原则，震级上限定为6.5级。
16	旅顺潜在震源区	6.0		沿北西向艾子口断裂划分，为早、中更新世活动断裂。现代小震活动频繁，最大地震为ML4.5级。综合上述特征，将其震级上限定为6.0级。
19	沙北潜在震源区	7.0		主体位于渤中断陷的中西部，北部还包括了石臼坨断凸的东部。区内近东西—北东东向和北西向断裂发育，其中向北凸起的沙北断裂早中更新世活动，北西西向石臼坨1号断裂在第四纪有明显活动。区内曾发生1568年6级和 $5\frac{3}{4}$ 级地震，现今小震活跃。依据地震构造类比，震级上限定为7.0级。
20	沙南潜在震源区	6.5		该区主体包括沙垒田断凸和沙南断凹北侧及其之间的第四纪早期活动的边界断裂，考虑到本区处于活动背景较高的北西西向张家口—渤海断裂带上，故将震级上限定为6.5级。
21	渤南潜在震源区	7.5		区内发育北东向断裂与北西—近东西向断裂，其中黄北断裂规模较大，为渤南潜山凸起带和黄北断陷盆地的边界断裂，沙南断裂为沙南凹陷与渤南潜山凸起带的界限。上述断裂多数影响到第四系。区内沙南3号断裂上曾发生过1888年7.5级地震，现今小震活动活跃。将其震级上限定为7.5级。
22	渤中潜在震源区	8.0		主体位于张家口—渤海断裂带和营潍断裂带交汇部位，历史上1597年发生过7级地震，鉴于地震构造和强震活动特征，震级上限定为8.0级。

23	蓬莱潜在震源区	7.0	该潜源位于北西向胶东半岛北缘断裂带的部分海域断裂部位，该断裂控制了北西向岛屿、海峡、海槽的发育。区内历史上曾发生过 1548 年 7 级地震和 1621 年 5 级左右地震。现今小震密集成带，呈北西向。将潜源震级上限定为 7.0 级。
24	大港潜在震源区	6.5	沿海 17 井断裂、埕北断裂划分，前者为晚更新世断裂，后者为早、中更新世断裂，区内曾发生过 5.5 级地震。现代小震活动较少，1970 年以后的仪器记录地震有 4 次，最大地震为 ML3.8 级。根据上述特征，将其震级上限定为 6.5 级。
25	埕北潜在震源区	6.5	主体位于北西向埕北断裂及其控制的埕北凹陷和埕北凸起部位。据石油勘探人工地震资料，埕北断裂，上第三系底（T2）垂直落差 510m，向上影响到第四系，根据构造类比，震级上限定为 6.5 级。
26	渤东南潜在震源区	7.5	沿黄北断裂、黄河口断裂、垦北断裂划分，前两条断裂为晚更新世断裂。区内历史上曾发生 1969 年 7.4 级地震。鉴于地震构造和强震活动特征，震级上限定为 7.5 级。
27	龙口潜在震源区	6.0	主体沿龙口断裂划分，该断裂为早、中更新世活动断裂，现代小震活动频繁，1970 年以后的仪器记录地震有 111 次，最大地震为 ML3.8 级。根据构造类比原则，震级上限定为 6.0 级。
28	亭口潜在震源区	6.0	多组北东向断裂和北西向断裂交汇在该区，这些断裂均为前第四纪断裂。现今小震频繁。1970 年以后的仪器记录地震有 57 次，最大地震为 ML4.4 级。将其震级上限定为 6.0 级。
29	埕子口潜在震源区	6.0	主体位于近北东向埕南断裂部位，是一条长度约 120 公里的活动时代第四系的正断层。根据区域发震构造标志，综合判定其震级上限为 6.0 级。
30	东营潜在震源区	6.0	区内主要发育有胜北断裂和东营断裂。胜北断裂主体部分为近东西向分布，属第四纪早期仍有活动的断裂；东营断裂为第四纪不活动断裂。区内历史上发生过 1588 年 5 级地震，现代小震活动频繁。根据构造类比原则，并考虑历史地震的因素，将本区最大震级定为 6.0 级。

	31	潍坊潜在震源区	6.5	沿郯庐断裂带安丘以北至龙口以西西支断裂划分，这两条断裂均为第四纪早期断裂。区内莱州湾海域分别于 1346 年和 1584 年发生过 5 级地震。根据构造类比原则，将其震级上限定为 6.5 级。
	32	昌邑潜在震源区	7.0	位于郯庐断裂带内，沿郯庐断裂带安丘以北至龙口以西东支断裂龙口断裂和蓬莱 1 号断裂划分，这两条断裂为晚更新世—全新世活动断裂。根据构造类比原则，将其震级上限定为 7.0 级。
东北地震统计区	33	宁城潜在震源区	7.0	该震源区位于辽西—宁城地震构造带的南段，发育多条北东—北北东向活动断裂，还有一些近东西向断裂与之交汇。该潜在震源区现今地震活动密集，呈北东向展布，历史上曾发生过 1290 年宁城 $6\frac{3}{4}$ 级地震。边界的划定主要以宁城盆地的边界并考虑断裂展布及地震的活动特征，判定该潜在震源区震级上限为 7.0 级。
	34	敖汉潜在震源区	6.0	该潜源区内分布有康宝-(赤峰)围场断裂与朱碌科-中三家断裂。该潜源区内记录到 5 级左右地震。该震源震级上限定为 6.0 级。
	35	朝阳潜在震源区	6.0	该潜源沿北东向的北票—朝阳断裂两侧划分，断裂第四纪以来活动明显。现代小震密集成带分布，在朝阳附近历史上发生过 $5\frac{1}{2}$ 级地震。该震源震级上限定为 6.0 级。
	36	义县潜在震源区	6.0	北票—义县断裂通过本区，走向 NWW。该潜源区内记录到 5 级左右地震，现代有小震活动。依据构造类比和历史地震确定其震级上限取 6.0 级。

(1) 秦北 6.0 级潜在震源区(10 号):

沿秦北断裂划分，长约 90km，走向 NNE，正断，为第四纪早期活动断裂。区内发育石臼坨断裂、渤海 2 号断裂、旅大断裂等，区内没有 5 级以上历史地震，现代小震活动频繁。考虑到南部沙北潜源的影响，震级上限定为 6.0 级。

(2) 渤中 8.0 级潜在震源区 (22 号) :

主体位于张家口—渤海断裂带和营潍断裂带交汇部位。历史上 1597 年发生过 7 级地震。现今小震频繁。1970 年以后的仪器记录地震有 84 次，2-2.9 级地震 49 次，3-3.9 级地震 32 次，4-4.9 级地震 3 次，最大地震为 ML4.9 级。鉴于地震

构造和强震活动特征，震级上限定为 8.0 级。

(3) 昌黎 6.0 级潜在震源区 (9 号) :

昌黎断裂自秦皇岛、昌黎、倭城向西止于唐山断裂带，总体走向北东东，倾向南东，倾角 35—50°，为一正断层。它控制了南侧黄骅拗陷北段中、新生代沉积，是燕山山前隆起与黄骅拗陷的边界。进入新生代以来断裂活动明显，断裂南东盘古、新近纪时期强烈下陷，形成厚达 3000m 左右的堆积盆地；而断裂西北侧则不断上升，基本缺失古近系堆积。另据钻孔资料，断裂在第四纪时仍有活动，位于上升盘的奔 9 孔孔深约 352.8m 见下更新统，终孔深 497.7m 见新近系，而下降盘的奔 4 孔下更新统顶面孔深约 453.81m，孔深 482.2m 见新近系，下更新统顶面落差达 100m 左右，而上更新统底界未见明显位错。据在倭城一带进行的浅层地震勘探资料，该断裂错断了中更新统及其以下的地层，但未断错上更新统。历史上仅在断裂东段昌黎一带发生过 1567 年的 4.75 级和 1805 年的 5.5 级地震。现今小震也无沿断裂密集成带的趋势，说明该断裂现今活动不明显，是一条早、中更新世活动断裂。

沿北东向昌黎断裂和北西向建昌营断裂划分，这两条断裂第四纪早期有过活动，历史上发生 4.7 级以上地震 4 次，最大地震为 1945 年滦县 6 $\frac{1}{4}$  级地震。现代小震活动密集成带。1970 年以后的仪器记录地震有 178 次，最大地震为 ML5.3 级。根据上述特征，将其震级上限定为 6.0 级。

(4) 唐山 8.0 级潜在震源区 (6 号) :

唐山断裂走向北东，倾向南东，倾角 80°左右，长约 50km，属正—平移性质。该断裂新生代以来活动明显，为晚更新世—全新世活动断层。1976 年唐山 7.8 级地震造成长约 8km 的地表形变带。

蓟运河断裂该断裂沿蓟运河展布，西北端与香河—宝坻断裂相连，东南端与滦县—乐亭断裂相交，走向 NW30°，长约 60km。断裂控制了古生代地层的分布和中生代盆地的发育，形成于前古生代，但在新生代仍有活动。蓟运河断裂不仅控制了蓟运河水系的展布，而且断裂两侧的水系格局也有明显差异，断裂南侧水系以南东流向为主，如青龙河、潮白河、海河等；北侧水系则以南西流向为主，如陡河、沙河、还乡河等。在卫星影像上断裂的线性特征也很明显。1976 年唐山 7.8 级地震的强余震—1976 年 11 月 15 日宁河 6.9 级地震沿此断裂有分布。

沿北东向唐山—河间—磁县断裂带与北西向蓟运河断裂的交汇部位划分，唐山断裂为晚更新世—全新世活动断层，蓟运河断裂为全新世活动断裂，1976 年在该区发生了 7.8 级地震，余震密集成带。1970 年以后的仪器记录地震有 1503 次。综合上述特征，将其震级上限定为 8.0 级。

(5) 滦县 7.5 级潜在震源区 (7 号) :

唐山断裂位于燕山断块南缘，是一条形成于燕山运动，晚第三纪以来逐步发育起来的唐山—河间—邢台新生地震构造带的组成部分。唐山断裂带为与褶皱伴生的复杂断裂构造带，主要展布于所在褶皱带的东南翼和开平向斜的西北翼，由

一系列互相平行的北北东—北东向断裂组成，控制着本区的地质构造活动，1976年唐山7.8级地震的发震构造，造成长度8km，右旋水平错距最大达1.53m，一般为0.4~1.2m，垂直错距为0.2~0.7m的地表破裂。

滦县-乐亭断裂位于山海关凸起和唐山凹陷之间，北段走向NNW至NNE，总体呈弧形，倾向NE，为高角度逆冲断裂。南段走向NW，倾向SW，为正断裂，是黄骅拗陷乐亭凹陷的边界断裂之一。1976年滦县7.1级地震发生在滦县—乐亭断裂北段，其震源机制解的NNE向右旋节面与该断裂北段一致，极震区等震级与与滦县—乐亭断裂北段一致，因此可以认为发震构造是该断裂。1945年滦县6级地震，兴隆庄附近为宏观震中区，烈度达Ⅷ度，极震区长轴方向为NNW向，推测滦县—乐亭断裂为其发震构造。

卢龙断裂南起滦县东北，沿青龙河经卢龙向东北方向延伸，总体呈NE30°走向，倾向SE，倾角63—75°，长40余公里。沿断裂有多处温泉分布。1976年断面西倾。唐山大地震后，卢龙附近发生过4次M5—5.7级地震，并且其震源机制解中的一组节面与卢龙断裂的走向一致，说明这些余震为卢龙断裂活动的结果。

沿北东向唐山断裂、北北西向滦县-乐亭断裂、北北东向卢龙断裂交汇部位划分，唐山断裂、滦县-乐亭断裂为全新世活动断裂，卢龙断裂为晚更新世活动断裂。历史上发生4.7级以上地震23次，最大地震为1976年7.1级地震。1970年以后的仪器记录地震有1806次，最大地震为ML5.9级。将震级上限定为7.5级。

## 5.4 潜在震源区的地震活动性参数

本报告采用的地震危险性概率分析方法，其地震活动性参数包括地震统计单元和潜在震源区的地震活动性参数两部分。地震统计单元的地震活动性参数包括震级上限 $M_{uz}$ ，起算震级 $M_0$ ，等级频度关系式中的 $b$ 值，采用“泊松模型”描述地震活动过程所需的地震年平均发生率 $\nu$ 。为了恰当地把地震带年平均发生率分配到每个潜在震源区，还要确定相关地震带中各潜在震源区的空间分布函数 $f_{i,mj}$ 以及各潜在震源区等震线椭圆长轴走向分布函数 $f_i(\theta)$ 。

### 5.4.1 地震活动性参数确定的原则

- (1) 以地震活动带作为地震活动性参数的基本统计单元。
- (2) 为保持地震事件的独立性和随机性，消除大地震余震和震群的影响。
- (3) 由地震活动趋势分析来衡量与评价未来地震活动水平，对年平均发生率 $\nu$ 进行调整。
- (4) 按震级档来进行年平均发生率的分配，并采用空间分布函数来描述地震活动的时、空不均匀性。
- (5) 用综合评定方法确定空间分布函数 $f_{i,mj}$ 时，各项因子的选择既要反映各潜在震源区存在的可靠性，也要考虑到地震活动时空的非均匀性，还要尽量吸收中长期地震预报研究中的结果。

### 5.4.2 潜在震源区地震活动性参数确定

#### (1) 潜在震源区的震级上限 $M_0$

潜在震源区的震级上限  $M_0$  是指该潜在震源区内可能发生的最大地震。本研究区各潜在震源区的震级上限见图 5.3.1。

#### (2) 空间分布函数 $f_{i,m_j}$

在地震统计区内，须把地震统计区各震级档地震的年平均年发生率分配给各相应的潜在震源区。这里采用空间分布函数，根据各潜在震源区发生不同震级档地震可能性的大小，对统计区各震级档的地震年平均发生率进行不等权分配。

空间分布函数  $f_{i,m_j}$  的物理含义是地震统计区内发生一个  $m_j$  档震级的地震落在第  $i$  个潜在震源区内概率的大小。在同一地震统计区内  $f_{i,m_j}$  满足归一条件：（对不同震级档  $m_j$ ）

$$\sum_{i=1}^n f_{i,m_j} = 1 \quad (\text{对不同震级档 } m_j)$$

这里  $n$  为地震统计区内第  $m_j$  档潜在震源区的总数。在本报告中， $m_j$  从 4.0 到 8.5 共分成 7 个震级档，即 4.0~4.9, 5.0~5.4, 5.5~5.9, 6.0~6.4, 6.5~6.9, 7.0~7.4,  $\geq 7.5$ 。

依据上述的原则与方法，结合本次工作的实际情况，对目标区影响较大的潜在震源区的空间分布函数列于表 5.4.1 中。

表 5.4.1 主要潜在震源区的空间分布函数

潜在震源区	4.0~4.9	5.0~5.4	5.5~5.9	6.0~6.4	6.5~6.9	7.0~7.4	$\geq 7.5$
秦北（10 号）	0.00965	0.0066	0.01645	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
渤中（22 号）	0.01225	0.00855	0.02261	0.03999	0.04926	0.22801	0.58423
唐山（6 号）	0.01086	0.00587	0.01369	0.02392	0.05701	0.07192	0.21024
昌黎（9 号）	0.00959	0.00564	0.02479	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
滦县（7 号）	0.00982	0.00539	0.0127	0.02764	0.05601	0.06085	0.00000
背景源（4）	0.01834	0.01234	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

#### (3) 椭圆长轴取向及其方向性函数

等震线长轴的取向与地震震源的破裂方式有关，而震源破裂方式又可以通过等震线形态和震源机制的研究结果来了解。一个地区等震线长轴的取向主要来源于对该地区等震线几何形状的统计研究。李钦祖（1976）和许忠淮（1979）等曾分别讨论过，华北地区等震线长轴取向有两个明显的优势方向，即北东和北西西向，二者频数之比约为 7:3。

在地震危险性分析计算中，等震线取向与相应潜在震源区的构造走向有关，其方向性函数可表示为：

$$f(\theta) = P_1 \delta(\theta_1) + P_2 \delta(\theta_2)$$

式中： $\theta$  为潜在震源区内构造走向与正东方向的夹角； $P_1$  和  $P_2$  为相应的取向概率。 $\theta$ 、 $P_1$  和  $P_2$  在同一潜在震源区内相同，不同的潜在震源区可以不同。具体确定时，按以下三种情况分别取值：①单一断层性质，主破裂面沿研究区构造走向，只有一个走向，其主破裂方向均取为新活动构造的走向；②共轭断层性质，

某些潜在震源区，两个方向的断裂相交汇，难以分清哪一组为主，两个方向的权重各占 50%；③一组断层为主，另一组断层为辅，主干断裂走向的概率为 70%，分支断裂走向的概率为 30%。

表 5.4.2 主要潜在震源区的方向性函数

编号	潜在震源区	Mu	$\theta_1(^{\circ})$	P1	$\theta_2(^{\circ})$	P2
10 号	秦北	6.0	0	0.50	90	0.50
22 号	渤中	8.0	45	0.70	130	0.30
6 号	唐山	8.0	50	1.00	0	0.00
9 号	昌黎	6.0	120	1.00	0	0.00
7 号	滦县	7.5	50	1.00	0	0.00
4	背景源	5.5	0	0.50	90	0.50

## 5.5 基岩地震动衰减关系

### (1) 地震动衰减关系与预测方程的确定

基岩地震动衰减关系是地震危险性分析中的重要环节。由于本项目区域处于中国东部地区，该地区缺乏足够的强震记录，不能直接利用强震记录来统计其衰减关系。本工作对地震动峰值位移和长周期反应谱的估计采用如下方式：

①对于小震、近震记录，认为加速度记录中蕴涵的实际地震动的长周期成分很少，对其进行滤波和基线校正后积分得到的峰值位移是可靠的；

②对于其他记录，综合对原始加速度记录进行滤波和基线校正后积分得到的峰值位移、利用 10.0 秒处位移谱估计的峰值位移 (Campbell 和 Bozorgnia, 2006)、以及利用震级定义估计的峰值位移 (俞言祥, 2002) 三种结果，对原始记录的峰值位移进行估计，为保守计，可取其中的最大值作为峰值位移的估计。

地震动反应谱衰减关系采用中国地震局震害防御司印发的《区域性地震安全性评价工作大纲 (试行)》中的中国东部强震活跃区地震动反应谱衰减关系，见表 5.5.1 和表 5.5.2。在地震动参数衰减模型中，考虑到加速度峰值和反应谱的高频分量在大震级和近距离的饱和特性，采用如下椭圆衰减模型：

当  $M < 6.5$  时，

$$\lg Y(M, R) = A_1 + B_1 M - C \lg(R + D \exp(E * M))$$

当  $M \geq 6.5$  时，

$$\lg Y(M, R) = A_2 + B_2 M - C \lg(R + D \exp(E * M))$$

其中  $M$  为面波震级， $R$  为震中距， $A_1$ 、 $A_2$ 、 $B_1$ 、 $B_2$ 、 $C$ 、 $D$ 、 $E$  为模型系数。

表 5.5.1 中国东部强震活跃区基岩水平向加速度反应谱预测方程模型系数(长轴)

T(s)	A <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	B <sub>2</sub>	C	D	E	$\sigma$
PGA	2.024	0.673	3.565	0.435	2.329	2.088	0.399	0.245
0.04	2.048	0.674	3.617	0.432	2.322	2.088	0.399	0.261
0.05	2.205	0.654	3.706	0.423	2.319	2.088	0.399	0.266
0.07	2.315	0.650	3.774	0.425	2.307	2.088	0.399	0.265

0.10	2.456	0.640	3.903	0.417	2.297	2.088	0.399	0.261
0.12	2.493	0.637	3.855	0.427	2.294	2.088	0.399	0.261
0.16	2.617	0.632	3.798	0.449	2.306	2.088	0.399	0.261
0.20	2.558	0.643	3.680	0.470	2.309	2.088	0.399	0.261
0.24	2.320	0.675	3.632	0.472	2.290	2.088	0.399	0.264
0.26	2.094	0.696	3.541	0.472	2.249	2.088	0.399	0.270
0.30	1.878	0.715	3.426	0.477	2.211	2.088	0.399	0.274
0.34	1.852	0.715	3.304	0.491	2.212	2.088	0.399	0.273
0.40	1.501	0.765	3.262	0.494	2.214	2.088	0.399	0.274
0.50	1.358	0.776	3.026	0.519	2.214	2.088	0.399	0.276
0.60	1.004	0.814	2.885	0.524	2.187	2.088	0.399	0.283
0.80	0.650	0.847	2.608	0.545	2.174	2.088	0.399	0.291
1.00	0.226	0.895	2.409	0.559	2.157	2.088	0.399	0.300
1.20	0.006	0.917	2.227	0.574	2.159	2.088	0.399	0.315
1.50	-0.095	0.909	1.843	0.610	2.154	2.088	0.399	0.330
1.70	-0.196	0.909	1.621	0.629	2.143	2.088	0.399	0.338
2.00	-0.666	0.936	1.247	0.641	2.047	2.088	0.399	0.342
2.40	-0.781	0.917	0.709	0.687	2.011	2.088	0.399	0.343
3.00	-1.014	0.920	0.279	0.720	1.972	2.088	0.399	0.340
4.00	-1.244	0.909	-0.368	0.773	1.937	2.088	0.399	0.336
5.00	-1.417	0.900	-0.880	0.817	1.906	2.088	0.399	0.333
6.00	-1.432	0.859	-1.432	0.859	1.857	2.088	0.399	0.333
7.00	-1.692	0.865	-1.692	0.865	1.803	2.088	0.399	0.336
8.00	-1.862	0.875	-1.862	0.875	1.788	2.088	0.399	0.342
9.00	-2.113	0.885	-2.113	0.885	1.743	2.088	0.399	0.346
10.00	-2.177	0.879	-2.177	0.879	1.730	2.088	0.399	0.352

注： $\alpha$  为标准差；适用范围 M5.0-8.5,R0-200km

表 5.5.2 中国东部强震活跃区基岩水平向加速度反应谱预测方程模型系数(短轴)

T(s)	A <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	B <sub>2</sub>	C	D	E	$\sigma$
PGA	1.204	0.664	2.789	0.420	2.016	0.944	0.447	0.245
0.04	1.241	0.663	2.837	0.418	2.010	0.944	0.447	0.261
0.05	1.393	0.645	2.933	0.408	2.007	0.944	0.447	0.266
0.07	1.517	0.639	3.005	0.411	1.997	0.944	0.447	0.265
0.10	1.665	0.629	3.140	0.402	1.988	0.944	0.447	0.261
0.12	1.707	0.625	3.091	0.412	1.985	0.944	0.447	0.261
0.16	1.814	0.622	3.053	0.431	1.997	0.944	0.447	0.261
0.20	1.779	0.628	2.918	0.454	1.999	0.944	0.447	0.261
0.24	1.533	0.662	2.868	0.457	1.983	0.944	0.447	0.264
0.26	1.309	0.685	2.786	0.458	1.948	0.944	0.447	0.270
0.30	1.095	0.707	2.677	0.464	1.915	0.944	0.447	0.274
0.34	1.068	0.706	2.558	0.477	1.916	0.944	0.447	0.273

0.40	0.698	0.759	2.501	0.482	1.919	0.944	0.447	0.274
0.50	0.557	0.769	2.265	0.507	1.919	0.944	0.447	0.276
0.60	0.196	0.810	2.122	0.514	1.897	0.944	0.447	0.283
0.80	-0.162	0.844	1.851	0.535	1.887	0.944	0.447	0.291
1.00	-0.599	0.895	1.644	0.550	1.873	0.944	0.447	0.300
1.20	-0.815	0.915	1.455	0.567	1.875	0.944	0.447	0.315
1.50	-0.910	0.907	1.087	0.600	1.871	0.944	0.447	0.330
1.70	-1.000	0.906	0.869	0.619	1.861	0.944	0.447	0.338
2.00	-1.449	0.934	0.516	0.632	1.779	0.944	0.447	0.342
2.40	-1.524	0.911	0.002	0.677	1.748	0.944	0.447	0.343
3.00	-1.733	0.912	-0.414	0.710	1.716	0.944	0.447	0.340
4.00	-1.932	0.898	-1.038	0.761	1.686	0.944	0.447	0.336
5.00	-2.075	0.887	-1.532	0.804	1.659	0.944	0.447	0.333
6.00	-2.041	0.841	-2.041	0.841	1.617	0.944	0.447	0.333
7.00	-2.287	0.848	-2.287	0.848	1.570	0.944	0.447	0.336
8.00	-2.455	0.858	-2.455	0.858	1.558	0.944	0.447	0.342
9.00	-2.693	0.869	-2.693	0.869	1.519	0.944	0.447	0.346
10.00	-2.753	0.863	-2.753	0.863	1.508	0.944	0.447	0.352

注：σ 为标准差；适用范围 M 5.0-8.5、R 0-200km

## (2) 衰减关系适用性论证

图5.5.1给出了本衰减关系（长、短轴）与美国西部（不分长、短轴）给出的地震动峰值加速度（长、短轴）的衰减关系对比结果。本峰值加速度衰减关系长轴衰减曲线比美国西部的偏高，在M=8.0时，与美国西部相应的衰减曲线大体一致。短轴衰减曲线在R>10km, M=6.0时，与美国西部相应的衰减曲线大体一致；在R≤10km时，短轴衰减曲线的偏高，在R>10km, M>6.0时，美国西部的偏高。

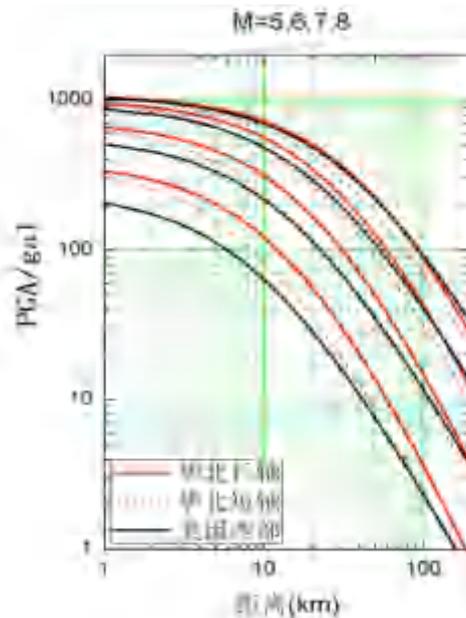


图 5.5.1 本衰减关系（中国中强）与美国西部衰减关系对比

本次采用的中国东部强震活跃区水平向基岩加速度反应谱衰减关系能够较好地反映本地区的地震构造环境和介质传播特征,并已在多个河北省重要工程项目地震安全性评价和地震小区划工作中得到应用,适合于本地区,可满足本项目的需求。

## 5.6 地震危险性的概率计算及结果

### 5.6.1 计算模型

鉴于区域内地震的衰减具有方向性,其往往取决于发震断层的方向,沿断层方向衰减慢,垂直于断层方向衰减快,通常称衰减长轴方向和短轴方向,并且有些地震的发生,断层破裂具有共轭的特征,因此,该工作选用共轭椭圆衰减模型。

### 5.6.2 不确定性校正

概率地震危险性分析中,每个环节都存在不确定性,往往对结果会产生较大的影响,应充分考虑不确定性的影响。

(1) 应考虑地震动衰减关系的不确定校正。对计算结果应进行衰减不确定性校正,采用下式进行校正:

$$P(Y' > y') = \left( \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \right) \int_{-3\sigma}^{3\sigma} P(Y' > y' \cdot e^{-Z}) \cdot f(Z) dz$$

式中  $Z$  值是均值为零,标准差为  $\sigma$  的正态随机变量;  $f(z) = e^{-\frac{z^2}{2\sigma^2}}$ 。

在目前实际应用的地震危险性概率分析计算程序包中,自动进行了衰减关系的不确定校正。

(2) 地震带和潜在震源区的地震活动性参数都有一定的不确定性,这种不确定性对区划结果可能产生重要影响。因此必须考虑在震源区和地震活动性参数的可变动范围及其对结果的影响。

地震带和潜在震源区的地震活动性参数不确定性通常采用参数敏感性分析结果来衡量其影响,即对各项地震活动性参数进行敏感性分析来评估计算结果的不确定性影响,对各控制点进行计算得到其均值和方差,将均值加上一倍方差作为最终计算结果。

具体做法是如下:在危险性分析计算时分别按地震年平均发生率变化 $\pm 50\%$ 、震级上限变动范围 $\pm 0.5$ 级、 $b$ 值变化范围取 $\pm 0.05$ ;潜在震源主破震方向 $\pm 15^\circ$ ,计算得到各控制点均值及其方差,地震动参数的不确定性在 $10\% \sim 20\%$ 范围内。

### 5.6.3 计算结果

根据前面所确定的潜在震源区、地震活动性参数及基岩加速度反应谱衰减关系,利用概率分析方法,进行地震危险性分析计算。

在目标区划范围内控制以  $700\text{m} \times 700\text{m}$  的进行了计算控制点(钻孔)布置,共布置了 86 个点计算控制点(钻孔)。

目标区内 86 个计算控制点（钻孔）的 50 年超越概率 63%、10%和 2%、100 年超越概率 63%、10%、2%和年超越概率  $10^{-4}$  的基岩地震动水平峰值加速度结果见表 5.6.1。

表 5.6.1 目标区内 86 个计算控制点基岩峰值计算结果

计算控制点	经度 (°)	纬度 (°)	50 年超越概率 (gal)			100 年超越概率 (gal)			年超越概率 $10^{-4}$
			63%	10%	2%	63%	10%	2%	
ZK1	119.398	39.921	29.3	94.5	178.1	43.6	128.1	220.8	266.9
ZK2	119.392	39.918	29.5	95.3	179.8	43.9	129.2	222.7	269.1
ZK3	119.400	39.916	29.3	94.5	178.0	43.6	128.0	220.6	266.6
ZK4	119.395	39.913	29.6	95.4	179.9	44.0	129.3	222.6	269.0
ZK5	119.389	39.909	29.8	96.3	181.4	44.4	130.5	224.6	271.2
ZK6	119.402	39.911	29.4	94.7	178.2	43.8	128.2	220.7	266.6
ZK7	119.397	39.907	29.7	95.6	179.9	44.1	129.4	222.6	268.8
ZK8	119.385	39.901	30.1	97.4	183.6	44.8	132.0	227.3	274.6
ZK9	119.391	39.904	29.9	96.4	181.6	44.5	130.7	224.7	271.4
ZK10	119.381	39.895	30.3	98.2	184.9	45.2	133.1	228.8	276.3
ZK11	119.379	39.889	30.5	98.9	186.0	45.5	134.0	230.0	277.7
ZK12	119.381	39.884	30.6	98.9	185.8	45.6	133.9	229.7	277.2
ZK13	119.385	39.879	30.6	98.7	185.2	45.6	133.6	228.9	276.1
ZK14	119.387	39.874	30.7	98.8	185.3	45.7	133.7	229.0	276.1
ZK15	119.394	39.875	30.6	98.0	183.7	45.4	132.5	227.0	273.8
ZK16	119.392	39.880	30.5	97.9	183.7	45.3	132.4	227.1	273.9
ZK17	119.389	39.886	30.4	97.9	183.8	45.2	132.5	227.2	274.2
ZK18	119.385	39.889	30.4	98.1	184.4	45.2	132.8	228.1	275.4
ZK19	119.387	39.894	30.2	97.6	183.8	45.0	132.3	227.4	274.7
ZK20	119.392	39.898	30.0	96.7	181.9	44.6	130.9	225.1	271.9
ZK21	119.398	39.901	29.8	95.8	180.2	44.3	129.7	222.9	269.0
ZK22	119.404	39.905	29.6	94.9	178.3	43.9	128.4	220.7	266.5
ZK23	119.413	39.905	29.4	93.9	176.1	43.6	126.9	218.1	263.4
ZK24	119.421	39.907	29.2	92.9	173.8	43.3	125.5	215.2	260.0
ZK25	119.428	39.908	29.0	91.9	171.8	42.9	124.1	212.7	257.2
ZK26	119.435	39.908	28.8	91.1	170.1	42.6	123.0	210.6	254.9
ZK27	119.442	39.910	28.6	90.3	168.1	42.4	121.8	208.1	252.0
ZK28	119.441	39.905	28.8	90.7	168.9	42.6	122.3	209.1	253.1
ZK29	119.433	39.902	29.0	91.9	171.4	43.0	124.0	212.2	256.7
ZK30	119.425	39.902	29.2	92.7	173.3	43.3	125.2	214.5	259.3
ZK31	119.418	39.901	29.4	93.6	175.2	43.6	126.4	217.0	262.1
ZK32	119.410	39.900	29.6	94.6	177.5	43.9	127.9	219.8	265.3
ZK33	119.404	39.899	29.7	95.3	179.1	44.2	129.0	221.5	267.4
ZK34	119.398	39.895	30.0	96.2	180.8	44.5	130.2	223.6	269.8
ZK35	119.393	39.891	30.2	97.1	182.6	44.9	131.5	225.9	272.7
ZK36	119.397	39.886	30.2	97.0	182.2	44.9	131.2	225.3	271.9

ZK37	119.398	39.880	30.3	97.2	182.5	45.1	131.5	225.6	272.2
ZK38	119.401	39.877	30.4	97.2	182.2	45.1	131.3	225.2	271.7
ZK39	119.407	39.879	30.2	96.3	180.5	44.8	130.1	223.1	269.0
ZK40	119.402	39.884	30.2	96.5	181.1	44.8	130.5	223.9	270.0
ZK41	119.401	39.890	30.0	96.2	180.7	44.6	130.2	223.4	269.5
ZK42	119.406	39.895	29.8	95.4	178.9	44.3	128.9	221.3	267.0
ZK43	119.414	39.895	29.6	94.4	176.9	43.9	127.6	219.1	264.4
ZK44	119.421	39.897	29.4	93.5	174.9	43.6	126.3	216.6	261.6
ZK45	119.427	39.898	29.3	92.8	173.3	43.4	125.3	214.5	259.1
ZK46	119.440	39.900	28.9	91.3	170.2	42.8	123.1	210.6	254.9
ZK47	119.434	39.897	29.2	92.1	171.8	43.2	124.2	212.6	257.0
ZK48	119.427	39.893	29.4	93.2	174.0	43.6	125.7	215.3	260.0
ZK49	119.419	39.891	29.6	94.1	176.1	43.9	127.1	218.0	263.2
ZK50	119.412	39.890	29.8	95.0	178.1	44.2	128.4	220.3	265.8
ZK51	119.406	39.888	30.0	95.8	179.6	44.5	129.5	222.0	267.8
ZK52	119.409	39.884	30.0	95.7	179.2	44.5	129.2	221.6	267.2
ZK53	119.413	39.880	30.0	95.6	178.8	44.6	129.0	221.0	266.4
ZK54	119.419	39.879	29.9	95.0	177.5	44.4	128.1	219.6	264.7
ZK55	119.418	39.882	29.9	94.9	177.4	44.3	128.0	219.5	264.6
ZK56	119.416	39.886	29.8	94.9	177.6	44.3	128.1	219.7	265.0
ZK57	119.423	39.887	29.7	94.0	175.8	43.9	126.9	217.6	262.6
ZK58	119.427	39.887	29.5	93.5	174.6	43.8	126.1	216.1	260.9
ZK59	119.434	39.891	29.3	92.5	172.4	43.4	124.7	213.3	257.8
ZK60	119.435	39.886	29.4	92.7	172.7	43.5	124.9	213.6	258.1
ZK61	119.437	39.882	29.5	92.8	172.9	43.6	125.1	213.8	258.2
ZK62	119.430	39.882	29.6	93.6	174.7	43.9	126.2	216.3	261.1
ZK63	119.424	39.881	29.8	94.2	176.1	44.1	127.1	217.9	262.9
ZK83	119.389	39.900	30.0	97.0	182.7	44.7	131.4	226.1	273.1
ZK84	119.434	39.880	29.6	93.3	173.8	43.8	125.7	215.1	259.7
ZK64	119.794	40.006	21.1	60.1	102.8	30.6	77.7	124.1	147.5
ZK65	119.798	40.000	21.2	60.4	103.3	30.8	78.1	124.8	148.4
ZK66	119.792	40.000	21.3	60.5	103.6	30.8	78.4	125.1	148.9
ZK67	119.795	39.996	21.4	60.8	104.1	31.0	78.7	125.6	149.6
ZK68	119.789	39.995	21.5	61.0	104.5	31.1	79.0	126.1	150.2
ZK69	119.784	39.998	21.4	60.9	104.2	31.0	78.8	125.8	149.9
ZK70	119.807	40.011	20.9	59.3	101.5	30.3	76.8	122.6	145.5
ZK71	119.815	40.013	20.8	59.1	101.1	30.2	76.4	122.0	144.8
ZK72	119.822	40.015	20.7	58.8	100.6	30.0	76.0	121.4	144.1
ZK73	119.828	40.017	20.6	58.5	100.1	29.9	75.6	120.9	143.4
ZK74	119.836	40.019	20.5	58.2	99.7	29.8	75.3	120.4	142.8
ZK75	119.836	40.016	20.6	58.5	100.1	29.9	75.6	120.9	143.5
ZK76	119.830	40.012	20.7	58.9	100.8	30.1	76.1	121.7	144.5
ZK77	119.822	40.011	20.8	59.1	101.2	30.2	76.5	122.2	145.1

ZK78	119.816	40.009	20.9	59.4	101.6	30.3	76.8	122.6	145.7
ZK85	119.782	39.996	21.5	61.1	104.6	31.1	79.1	126.3	150.4
ZK86	119.808	40.008	20.9	59.5	101.9	30.4	77.0	123.0	146.1
ZK79	119.812	40.007	20.9	59.5	101.9	30.4	77.0	123.0	146.1
ZK80	119.828	40.007	20.9	59.3	101.6	30.3	76.7	122.7	145.9
ZK81	119.826	40.004	21.0	59.6	102.0	30.4	77.0	123.2	146.5
ZK82	119.791	40.004	21.2	60.2	103.1	30.7	77.9	124.4	148.0

86个计算控制点分别在目标区不同片区内的超越概率曲线和反应谱曲线相差不大，因图件数量巨大，且受限于报告篇幅，本次报告中以位于不同片区中相对中心位置的42号和79号计算控制点为代表，给出其超越概率曲线图和基岩地震动加速度反应谱曲线，如下所述。

(1) 钻孔控制点 ZK42 计算结果

按照《区域性地震安全性评价工作大纲（试行）》要求，分别给出了目标区7种超越概率水平的计算结果。结果见图5.6.1和表5.6.1。图5.6.1给出了控制点1年、50年和100年的基岩水平加速度峰值超越概率曲线，50年超越概率和100年超越概率下基岩加速度反应谱的计算结果见表5.6.2和图5.6.2。

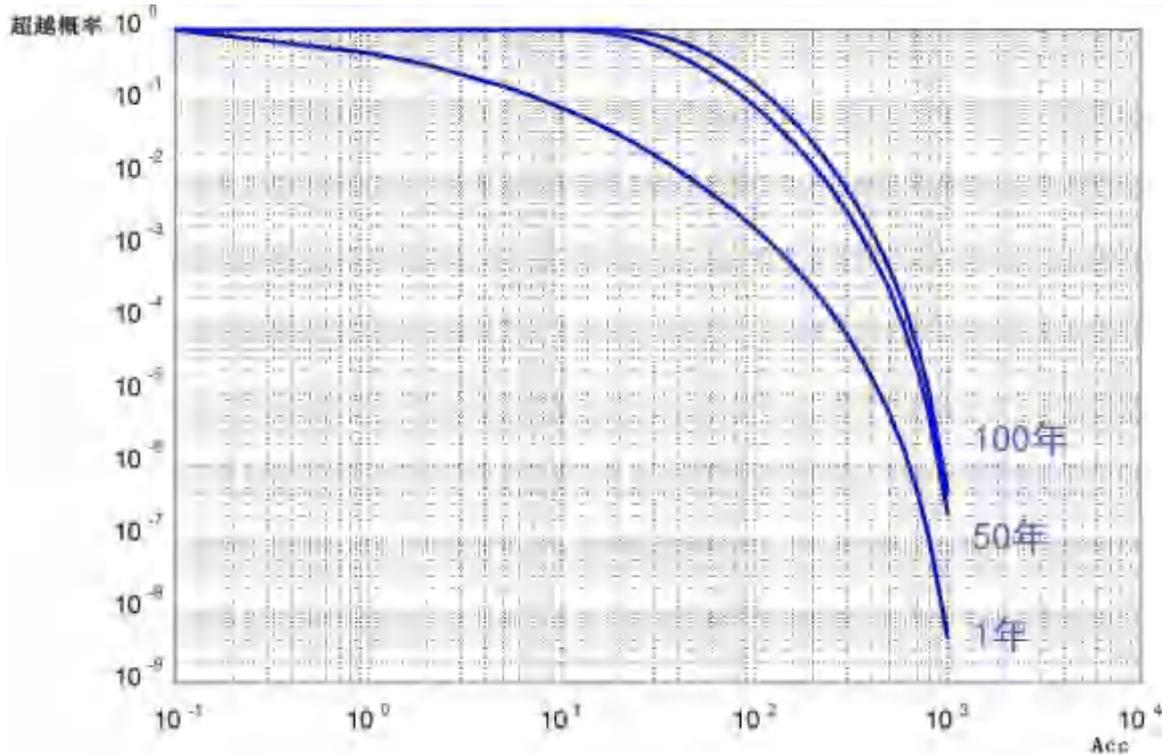


图 5.6.1 目标区基岩水平加速度峰值超越概率曲线图（钻孔控制点 ZK42）

表 5.6.2A 目标区基岩水平加速度反应谱(GAL)（钻孔控制点 ZK42）

周期 (s)	50 年超越概率		
	63%	10%	2%
PGA	29.8	95.4	178.9
0.04	33.8	109.2	207.3
0.05	38.9	124.0	233.8

0.07	50.1	158.7	298.9
0.10	63.7	199.2	370.4
0.12	67.9	211.6	393.8
0.16	80.5	250.6	465.7
0.20	80.1	252.1	472.0
0.24	74.2	241.3	459.3
0.26	69.2	229.9	442.6
0.30	64.7	219.7	426.9
0.34	60.1	204.6	398.2
0.40	50.7	181.5	359.8
0.50	42.4	155.2	310.1
0.60	35.7	135.2	274.5
0.80	26.6	105.5	217.8
1.00	21.3	88.9	187.0
1.20	17.2	74.3	158.3
1.50	13.2	59.5	130.4
1.70	11.3	52.2	116.1
2.00	8.9	42.1	94.7
2.40	6.4	31.2	71.6
3.00	4.7	23.6	55.1
4.00	2.8	15.0	35.9
5.00	2.0	11.0	27.1
6.00	1.3	7.9	19.8
7.00	1.0	6.3	16.0
8.00	0.9	5.4	14.0
9.00	0.7	4.5	11.8
10.00	0.6	3.7	9.7

表 5.6.2B 目标区基岩水平加速度反应谱(GAL) (钻孔控制点 ZK42)

周期 (s)	100 年超越概率			年超越概率
	63%	10%	2%	$10^{-4}$
PGA	44.3	128.9	221.3	267.0
0.04	50.4	148.8	257.6	313.6
0.05	57.8	168.0	290.9	354.8
0.07	74.3	215.2	372.5	453.6
0.10	94.1	267.7	459.7	558.2
0.12	100.2	284.3	487.7	591.9
0.16	118.8	337.0	577.8	701.6
0.20	118.5	340.4	586.9	713.7
0.24	110.8	328.7	573.4	700.1
0.26	104.0	314.9	555.0	680.2
0.30	98.1	302.6	537.1	660.2
0.34	91.1	281.3	501.0	615.2

0.40	78.3	252.3	454.6	561.3
0.50	66.1	216.9	393.4	487.1
0.60	56.4	190.6	350.7	435.5
0.80	42.8	149.7	279.2	349.6
1.00	35.0	127.1	241.7	304.6
1.20	28.7	107.0	205.8	260.3
1.50	22.3	86.9	171.3	219.3
1.70	19.2	76.7	153.0	196.8
2.00	15.3	62.2	125.0	160.8
2.40	11.1	46.6	95.0	122.5
3.00	8.1	35.6	73.6	95.3
4.00	5.0	22.9	48.1	62.3
5.00	3.5	17.1	36.4	47.3
6.00	2.4	12.4	26.7	34.9
7.00	1.9	10.0	21.7	28.4
8.00	1.6	8.6	19.0	25.0
9.00	1.3	7.3	16.1	21.2
10.00	1.1	6.0	13.3	17.6

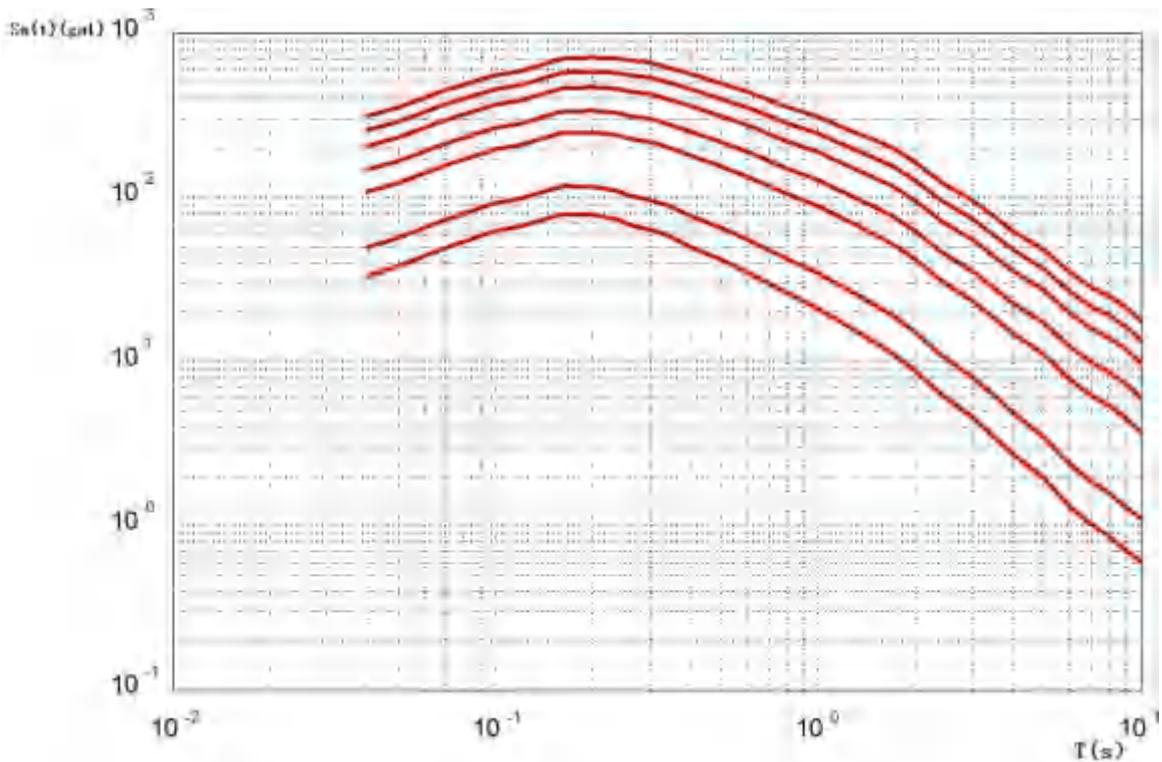


图 5.6.2 目标区基岩水平加速度反应谱曲线图（钻孔控制点 ZK42）

注：曲线从上至下依次为年超越概率  $10^{-4}$ 、100 年超越概率 2%、50 年超越概率 2%、100 年超越概率 10%、50 年超越概率 10%、100 年超越概率 63%、50 年超越概率 63%。

表 5.6.3 给出了主要潜源对钻孔控制点 ZK42 基岩 50 年与 100 年超越概率 63%、10%、2%及年超越概率  $10^{-4}$  对应的反应谱值贡献的百分比。

表 5.6.3a 主要潜源对钻孔控制点 ZK42 基岩地震动峰值加速度的贡献概率（ $T=0s$ ）（百分

比)

潜源	50年63%	100年63%	50年10%	100年10%	50年2%	100年2%	年超越概率 $10^{-4}$
昌黎(9号)	36.75	45.85	50.05	53.23	59.07	61.74	64.34
滦县(7号)	17.86	19.93	23.94	25.41	27.02	27.03	26.72
背景源(4)	33.46	27.04	21.17	18.51	13.90	11.23	8.95
其他	11.93	7.18	4.84	2.85	0	0	0

表 5.6.3b 主要潜源对钻孔控制点 ZK42 基岩地震动峰值加速度的贡献概率 (T=1s) (百分比)

潜源	50年63%	100年63%	50年10%	100年10%	50年2%	100年2%	年超越概率 $10^{-4}$
昌黎(9号)	28.34	25.46	24.44	26.04	22.54	20.69	18.37
滦县(7号)	17.22	28.40	42.11	49.04	58.27	63.61	68.19
唐山(6号)	10.50	12.48	14.56	14.00	13.61	12.93	11.92
渤中(22号)	11.75	10.35	7.99	6.80	4.11	2.77	1.52
背景源(4)	13.20	9.20	5.44	2.95	1.47	0	0
其他	18.99	14.21	5.45	1.16	0	0	0

表 5.6.3c 主要潜源对钻孔控制点 ZK42 基岩地震动峰值加速度的贡献概率 (T=2s) (百分比)

潜源	50年63%	100年63%	50年10%	100年10%	50年2%	100年2%	年超越概率 $10^{-4}$
渤中(22号)	16.00	15.19	14.73	13.04	8.89	6.80	4.82
唐山(6号)	8.50	10.27	17.29	19.97	21.30	21.66	22.45
昌黎(9号)	28.51	24.13	17.75	15.75	13.12	10.91	8.67
滦县(7号)	18.08	29.13	40.86	46.22	55.41	60.63	64.06
背景源(4)	12.96	8.71	4.17	2.97	0	0	0
其他	15.94	12.57	5.19	2.05	1.27	0	0

结果表明, 钻孔控制点 ZK42 的地震危险性来自周边地区多个潜在震源区的综合贡献, 50 年超越概率与 100 年超越概率对场地峰值加速度贡献最大的潜在震源区为昌黎潜在震源区 (9 号源), 其次为目标区所在的背景潜在震源区 (4) 以及滦县潜在震源区 (7 号源) 和其他潜在震源区。

对于周期为 1.0s 下主要潜源对钻孔控制点 ZK42 的地震危险性贡献, 50 年超越概率与 100 年超越概率对场地峰值加速度贡献最大的潜在震源区为昌黎潜在震源区 (9 号源), 其次为滦县潜在震源区 (7 号源)、唐山潜在震源区 (6 号源)、渤中潜在震源区 (22 号)、目标区所在的背景潜在震源区 (4) 和其他潜在震源区。

对于长周期 2.0s 下主要潜源对钻孔控制点 ZK42 的地震危险性贡献, 50 年超越概率与 100 年超越概率对场地峰值加速度贡献最大的潜在震源区为昌黎潜在震源区 (9 号源), 其次为滦县潜在震源区 (7 号源)、渤中潜在震源区 (22 号)、目标区所在的背景潜在震源区 (4) 以及唐山潜在震源区 (6 号源) 和其他潜在震源区, 可见随着反应谱周期的增加, 高震级潜在震源区对目标区场地加速度反应谱值的贡献逐渐增加。

## (2) 钻孔控制点 ZK79 计算结果

按照《区域性地震安全性评价工作大纲（试行）》要求，分别给出了目标区 7 种超越概率水平的计算结果。结果见图 5.6.3 和表 5.6.4。图 5.6.3 给出了控制点 1 年、50 年和 100 年的基岩水平加速度峰值超越概率曲线，50 年超越概率和 100 年超越概率下基岩加速度反应谱的计算结果见表 5.6.4 和图 5.6.4。

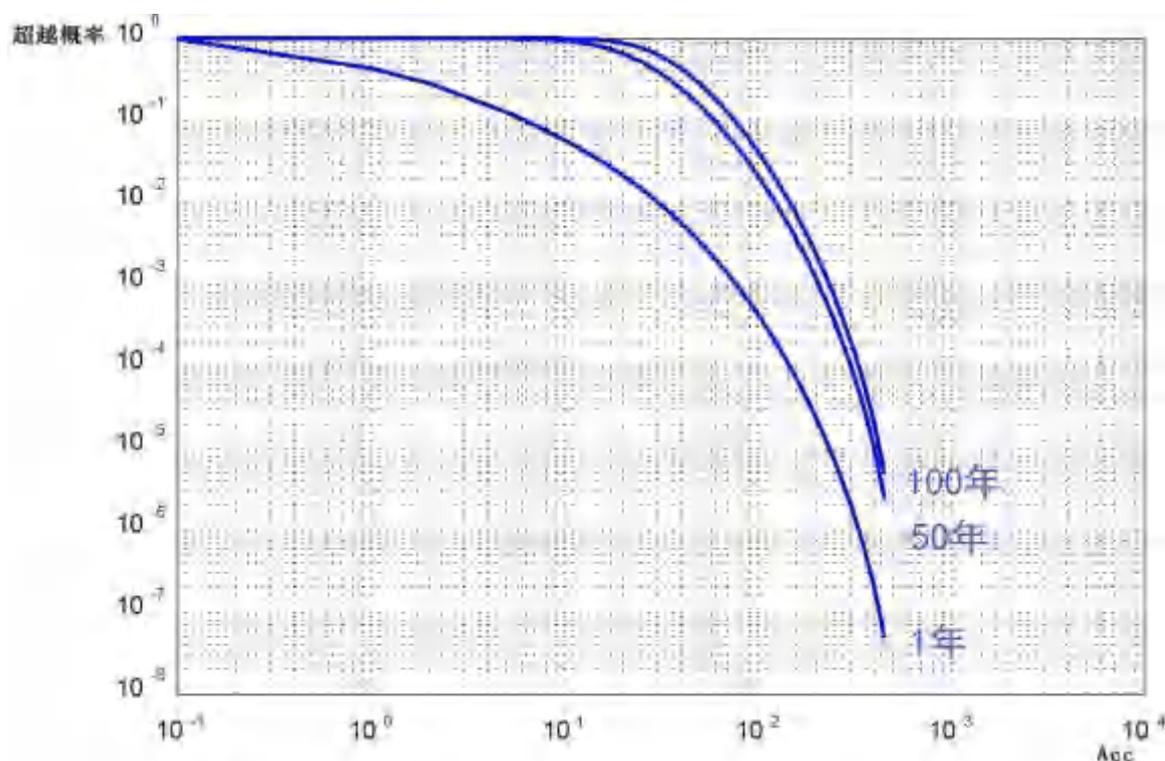


图 5.6.3 目标区基岩水平加速度峰值超越概率曲线图（钻孔控制点 ZK79）

表 5.6.4A 目标区基岩水平加速度反应谱(GAL)（钻孔控制点 ZK79）

周期 (s)	50 年超越概率		
	63%	10%	2%
PGA	20.9	59.5	101.9
0.04	23.8	68.9	119.5
0.05	27.2	78.4	135.7
0.07	35.2	100.6	173.9
0.10	44.6	125.9	217.0
0.12	47.5	133.9	230.5
0.16	56.0	158.6	272.3
0.20	55.9	159.9	275.5
0.24	52.8	154.2	267.8
0.26	50.2	149.2	261.3
0.30	47.7	144.6	256.1
0.34	44.4	134.6	239.0
0.40	38.0	120.7	217.1
0.50	31.9	103.8	189.0

0.60	27.2	92.3	170.6
0.80	20.5	73.0	137.9
1.00	16.6	62.5	121.3
1.20	13.5	52.6	103.7
1.50	10.3	42.6	87.2
1.70	8.8	37.6	78.5
2.00	7.0	31.1	66.1
2.40	5.1	23.3	51.0
3.00	3.7	18.1	40.4
4.00	2.3	11.6	26.8
5.00	1.6	8.5	20.4
6.00	1.1	6.2	15.2
7.00	0.8	5.0	12.5
8.00	0.7	4.3	10.9
9.00	0.6	3.5	9.1
10.00	0.5	3.0	7.6

表 5.6.4B 目标区基岩水平加速度反应谱(GAL) (钻孔控制点 ZK79)

周期 (s)	100 年超越概率			年超越概率
	63%	10%	2%	10 <sup>-4</sup>
PGA	30.4	77.0	123.0	146.1
0.04	34.7	89.8	145.0	173.0
0.05	39.6	102.0	164.9	197.3
0.07	51.0	130.5	211.1	251.6
0.10	64.4	163.3	262.2	312.4
0.12	68.6	173.8	278.5	331.7
0.16	81.1	205.8	329.8	393.3
0.20	81.3	207.9	333.9	398.5
0.24	77.3	201.3	325.4	388.9
0.26	73.8	195.5	318.2	381.0
0.30	70.8	190.5	312.6	374.8
0.34	65.7	177.5	291.7	350.3
0.40	57.3	159.8	265.7	319.8
0.50	48.6	138.3	232.4	280.1
0.60	42.1	124.1	211.2	255.9
0.80	32.2	99.4	172.0	209.9
1.00	26.7	86.1	152.3	186.9
1.20	22.0	73.1	130.6	161.1
1.50	17.1	60.2	111.6	139.3
1.70	14.7	53.6	101.2	126.8
2.00	11.9	44.8	85.8	108.2
2.40	8.6	34.0	66.7	84.9
3.00	6.5	26.7	53.0	67.7

4.00	3.9	17.4	35.5	45.6
5.00	2.8	13.1	27.2	35.1
6.00	1.9	9.6	20.4	26.4
7.00	1.5	7.9	16.8	21.8
8.00	1.3	6.9	14.7	19.2
9.00	1.1	5.7	12.4	16.1
10.00	0.9	4.8	10.3	13.5

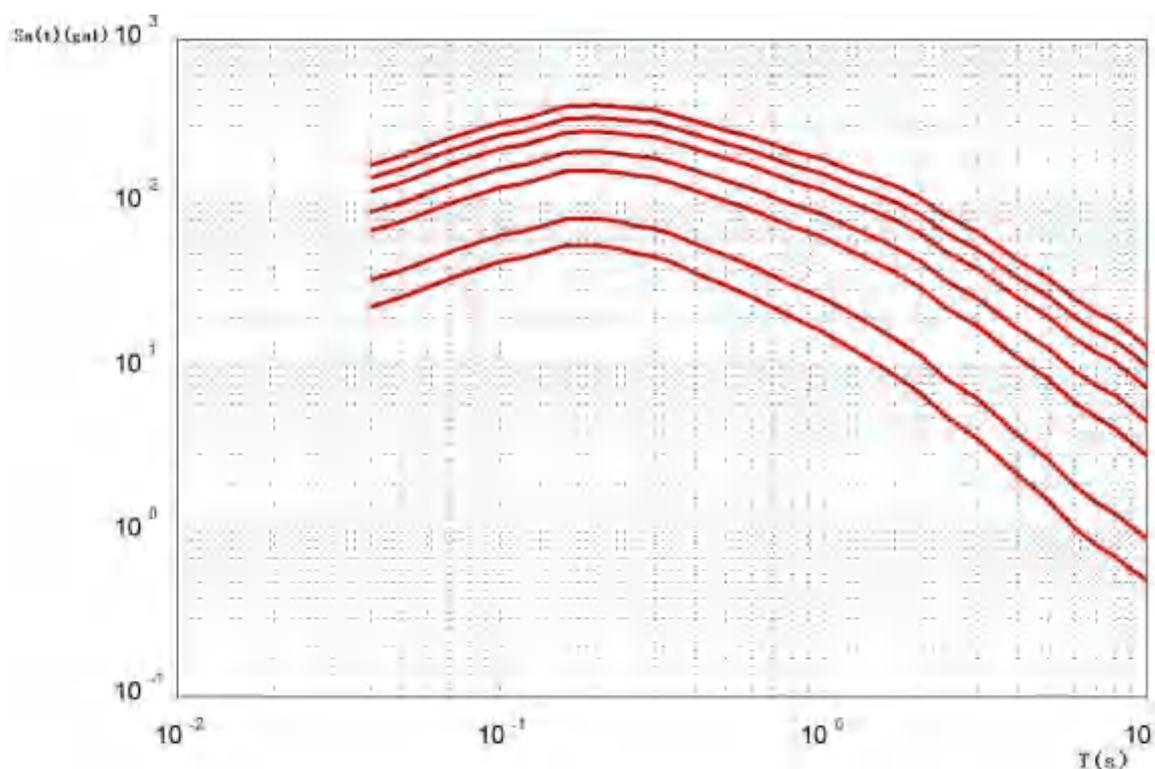


图 5.6.4 目标区基岩水平加速度反应谱曲线图（钻孔控制点 ZK79）

注：曲线从上至下依次为年超越概率  $10^{-4}$ 、100 年超越概率 2%、50 年超越概率 2%、100 年超越概率 10%、50 年超越概率 10%、100 年超越概率 63%、50 年超越概率 63%。

表 5.6.5 给出了主要潜源对钻孔控制点 ZK79 基岩 50 年与 100 年超越概率 63%、10%、2% 及年超越概率  $10^{-4}$  对应的反应谱值贡献的百分比。

表 5.6.5a 主要潜源对钻孔控制点 ZK79 基岩地震动峰值加速度的贡献概率（ $T=0s$ ）（百分比）

潜源	50 年 63%	100 年 63%	50 年 10%	100 年 10%	50 年 2%	100 年 2%	年超越概率 $10^{-4}$
秦北(10 号)	13.02	13.58	16.09	18.64	23.21	25.08	28.29
昌黎(9 号)	22.04	21.93	18.51	15.23	12.78	10.29	4.84
滦县(7 号)	15.83	14.12	13.27	12.1	10.5	6.77	2.92
唐山(6 号)	0	0	0	1.19	3.48	5.28	7.49
背景源(4)	30.95	34.54	38.11	42.74	46.9	50.46	55.1
其他	18.16	15.83	14.02	10.1	3.13	2.12	1.36

表 5.6.5b 主要潜源对钻孔控制点 ZK79 基岩地震动峰值加速度的贡献概率（ $T=1s$ ）（百分

比)

潜源	50年 63%	100年 63%	50年 10%	100年 10%	50年 2%	100年 2%	年超越概率 $10^{-4}$
秦北(10号)	7.18	7.04	6.96	6.90	6.73	6.60	6.56
渤中(22号)	11.93	14.17	16.57	16.58	18.86	20.03	20.88
唐山(6号)	11.74	13.36	16.64	18.94	21.08	22.91	25.56
昌黎(9号)	28.42	28.02	21.76	17.23	14.23	9.59	5.82
滦县(7号)	17.55	21.24	25.39	31.77	33.16	37.69	39.29
背景源(4)	8.83	7.76	5.92	5.03	3.54	2.06	1.62
其他	14.35	8.42	6.78	3.53	2.40	1.13	0.27

表 5.6.5c 主要潜源对钻孔控制点 ZK79 基岩地震动峰值加速度的贡献概率 ( $T=2s$ ) (百分比)

潜源	50年 63%	100年 63%	50年 10%	100年 10%	50年 2%	100年 2%	年超越概率 $10^{-4}$
秦北(10号)	10.28	8.90	4.61	4.15	3.37	1.93	0.45
渤中(22号)	17.17	20.62	24.19	26.96	27.48	28.21	30.54
唐山(6号)	7.51	10.03	15.19	18.94	20.31	22.34	24.36
昌黎(9号)	13.51	11.75	9.33	3.58	2.40	1.83	1.32
滦县(7号)	17.68	21.71	24.41	28.99	32.24	35.72	38.36
背景源(4)	13.95	10.62	8.21	6.62	5.78	3.37	1.07
其他	19.90	16.36	14.06	10.76	8.40	6.61	3.91

结果表明,钻孔控制点 ZK79 的地震危险性来自周边地区多个潜在震源区的综合贡献,50年超越概率与100年超越概率对场地峰值加速度贡献最大的潜在震源区为目标区所在的背景潜在震源区(4),其次为昌黎潜在震源区(9号源)、秦北潜在震源区(10号源)以及滦县潜在震源区(7号源)、唐山潜在震源区(6号源)和其他潜在震源区。

对于周期为 1.0s 下主要潜源对钻孔控制点 ZK79 的地震危险性贡献,50年超越概率与100年超越概率对场地峰值加速度贡献最大的潜在震源区为昌黎潜在震源区(9号源),其次为滦县潜在震源区(7号源)、唐山潜在震源区(6号源)、渤中潜在震源区(22号),以及秦北潜在震源区(10号源)、目标区所在的背景潜在震源区(4)和其他潜在震源区。

对于长周期 2.0s 下主要潜源对钻孔控制点 ZK79 的地震危险性贡献,50年超越概率与100年超越概率对场地峰值加速度贡献最大的潜在震源区为滦县潜在震源区(7号源)和渤中潜在震源区(22号),其次为目标区所在的背景潜在震源区(4)、昌黎潜在震源区(9号源)、秦北潜在震源区(10号源)以及唐山潜在震源区(6号源)和其他潜在震源区,可见随着反应谱周期的增加,高震级潜在震源区对目标区场地加速度反应谱值的贡献逐渐增加。

#### 5.6.4 钻孔控制点的总结果

通过钻孔位置作为钻孔控制点,共计 86 个钻孔控制点,对每个钻孔控制点进行了地震危险性计算,得到其分别 50 年、100 年的超越概率 63%、10%、2% 和年超越概率  $10^{-4}$  的的基岩峰值加速度,目标区中不同区块内的 86 个钻孔控制点基岩峰值加速度计算结果见图 5.6.5。

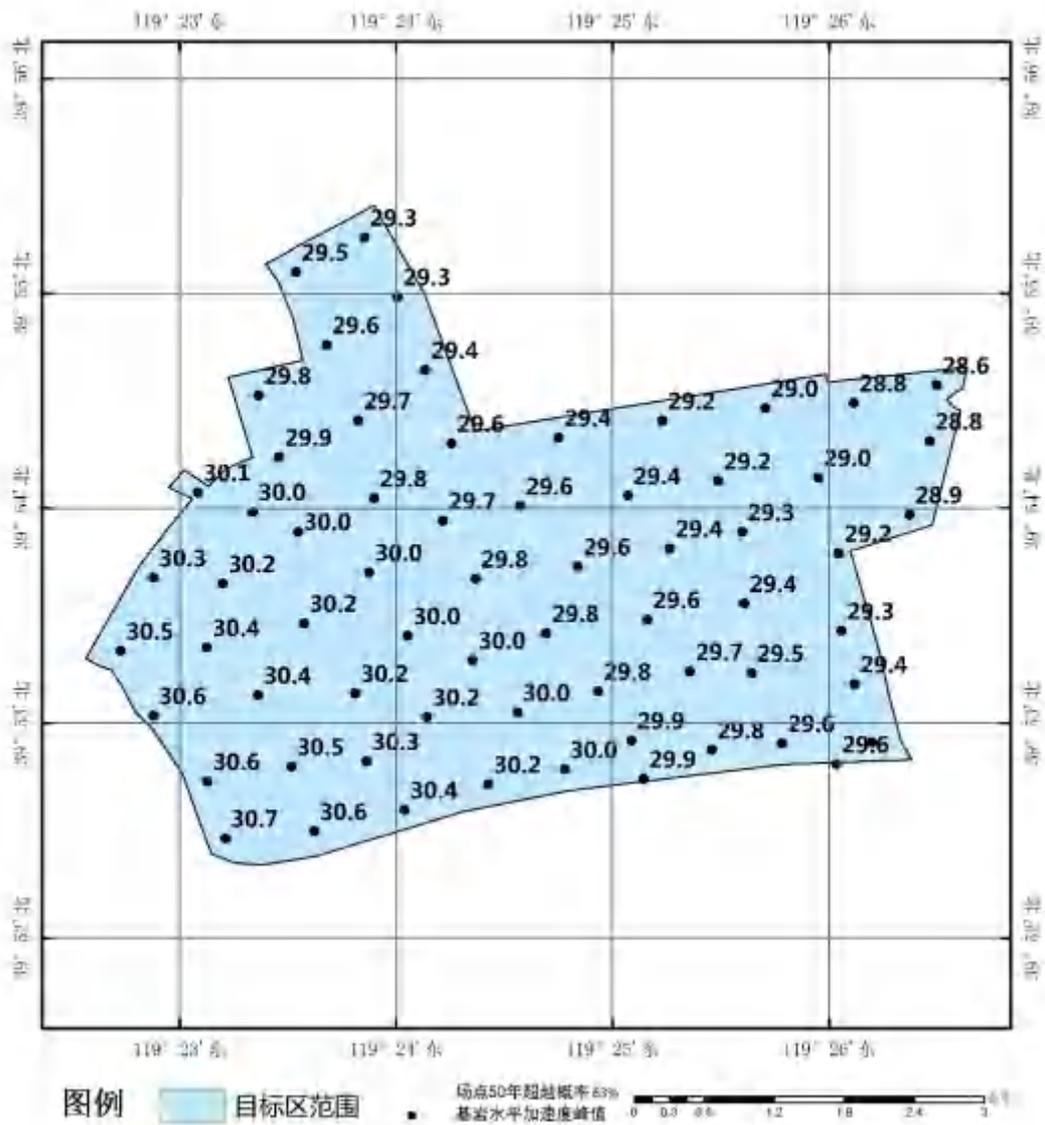


图 5.6.5A1 计算控制点及相应基岩地震动峰值加速度分布图（50 年超越概率 63%）

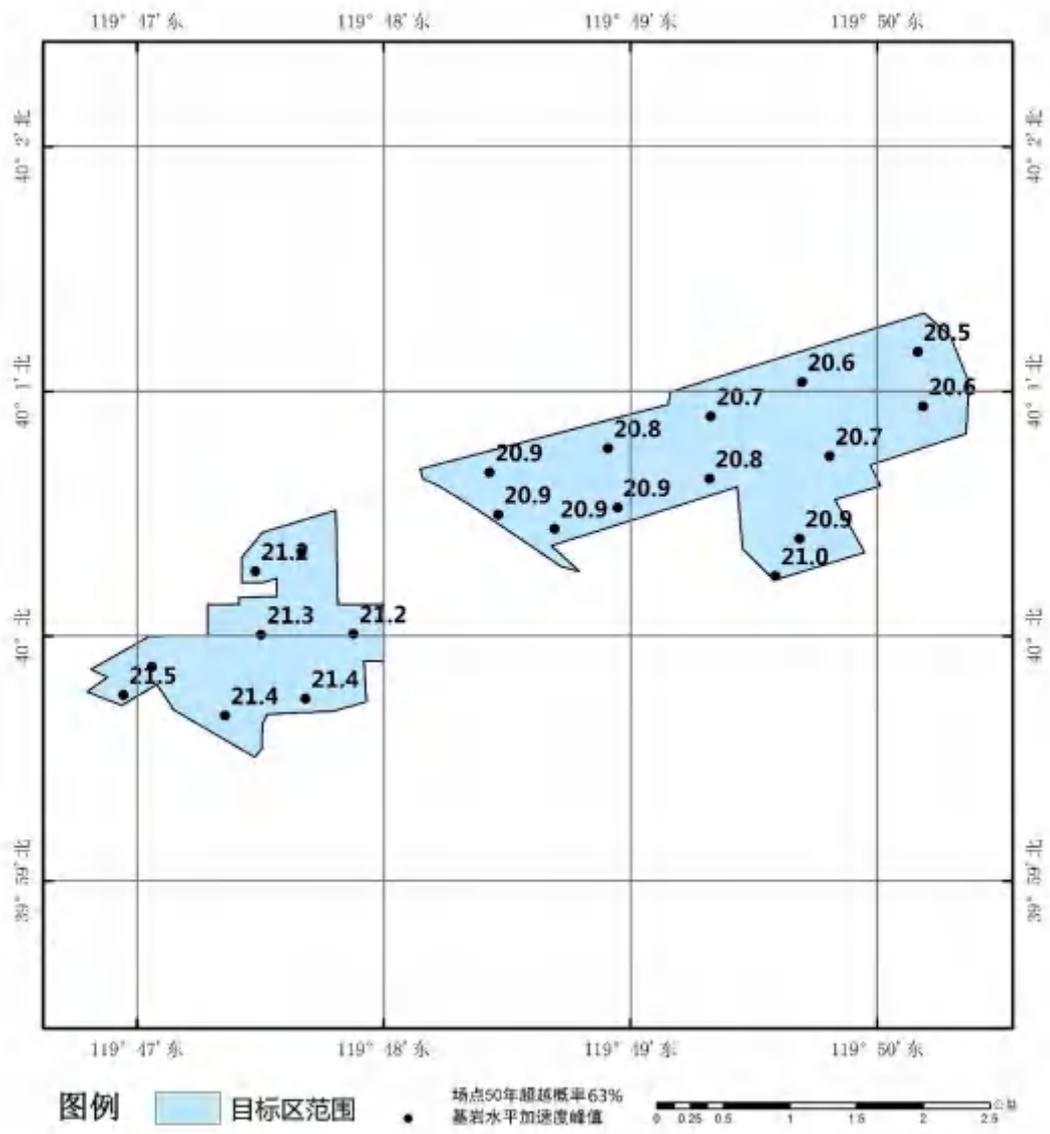


图 5.6.5A2 计算控制点及相应基岩地震动峰值加速度分布图（50 年超越概率 63%）

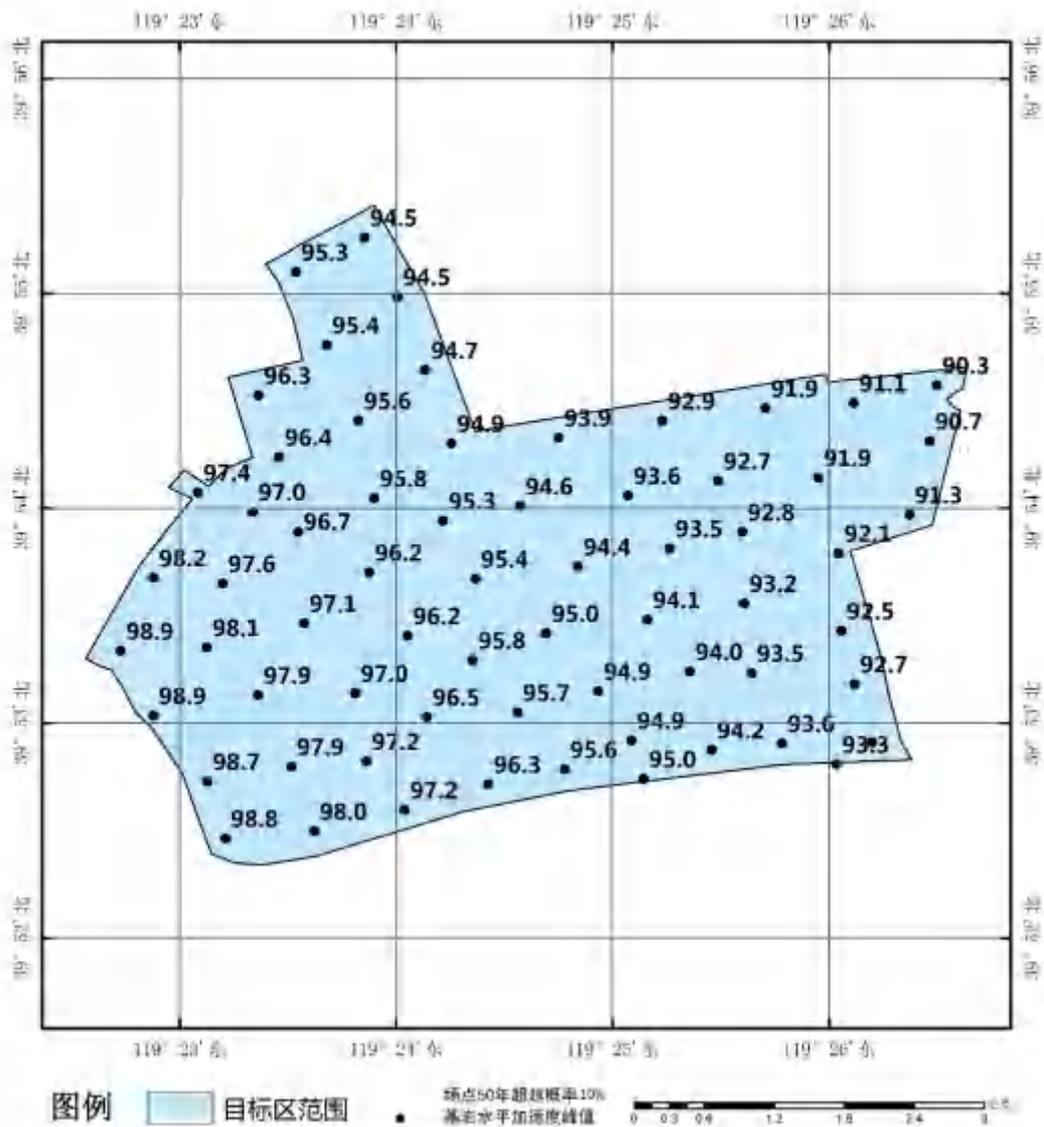


图 5.6.5B1 场点及相应基岩地震动峰值加速度分布图（50 年超越概率 10%）

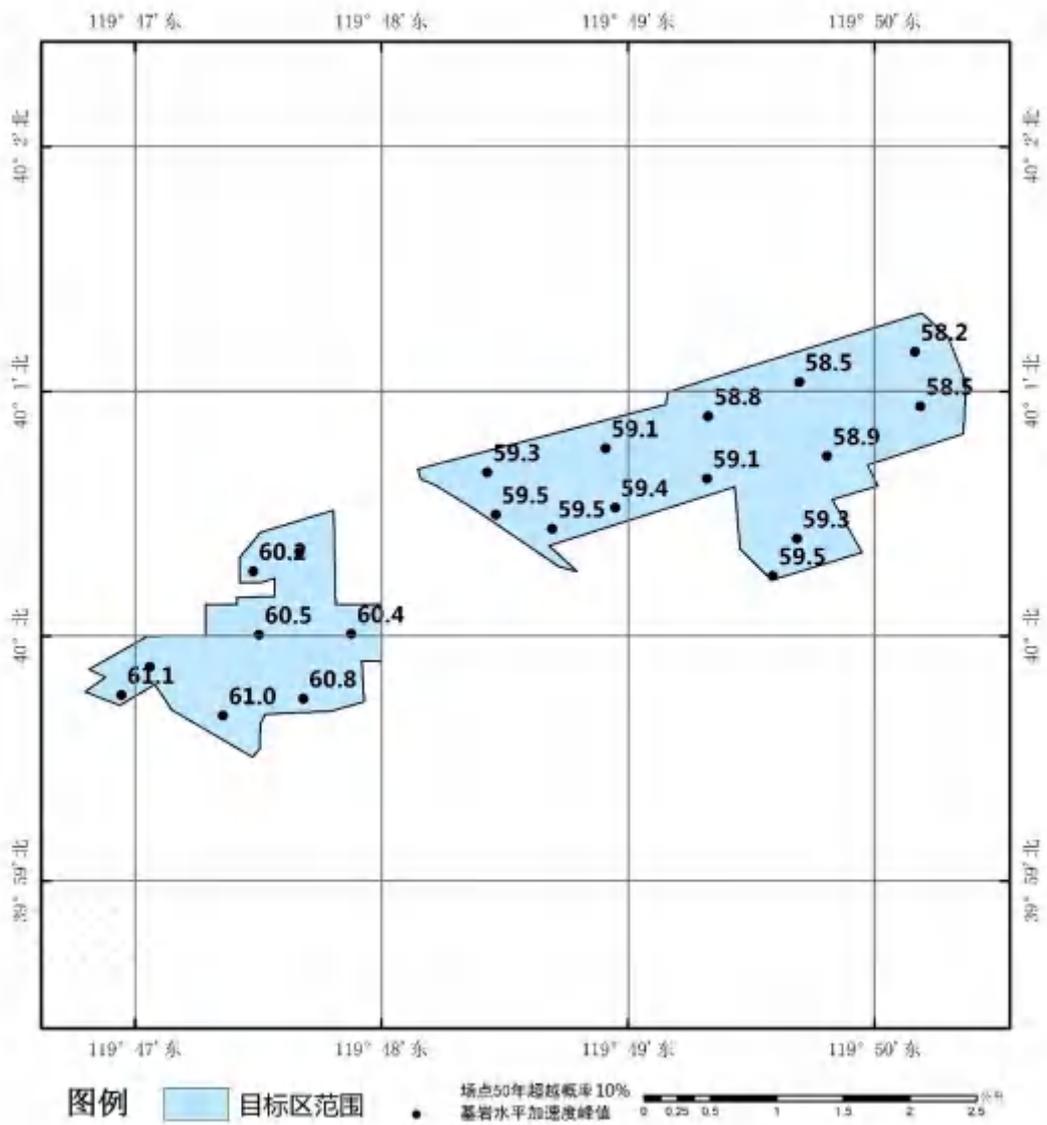


图 5.6.5B2 场点及相应基岩地震动峰值加速度分布图（50 年超越概率 10%）

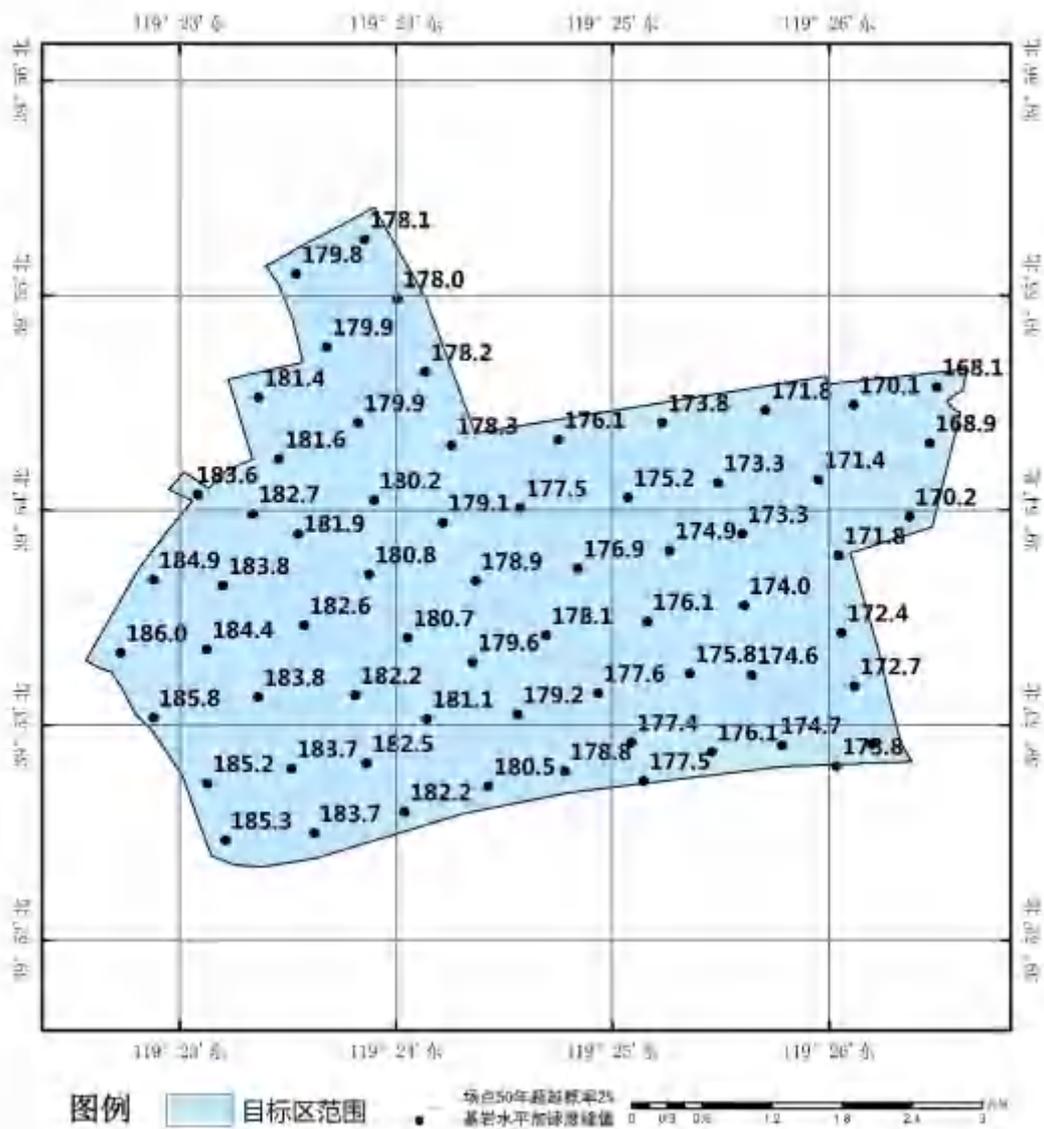


图 5.6.5C1 场点及相应基岩地震动峰值加速度分布图（50 年超越概率 2%）

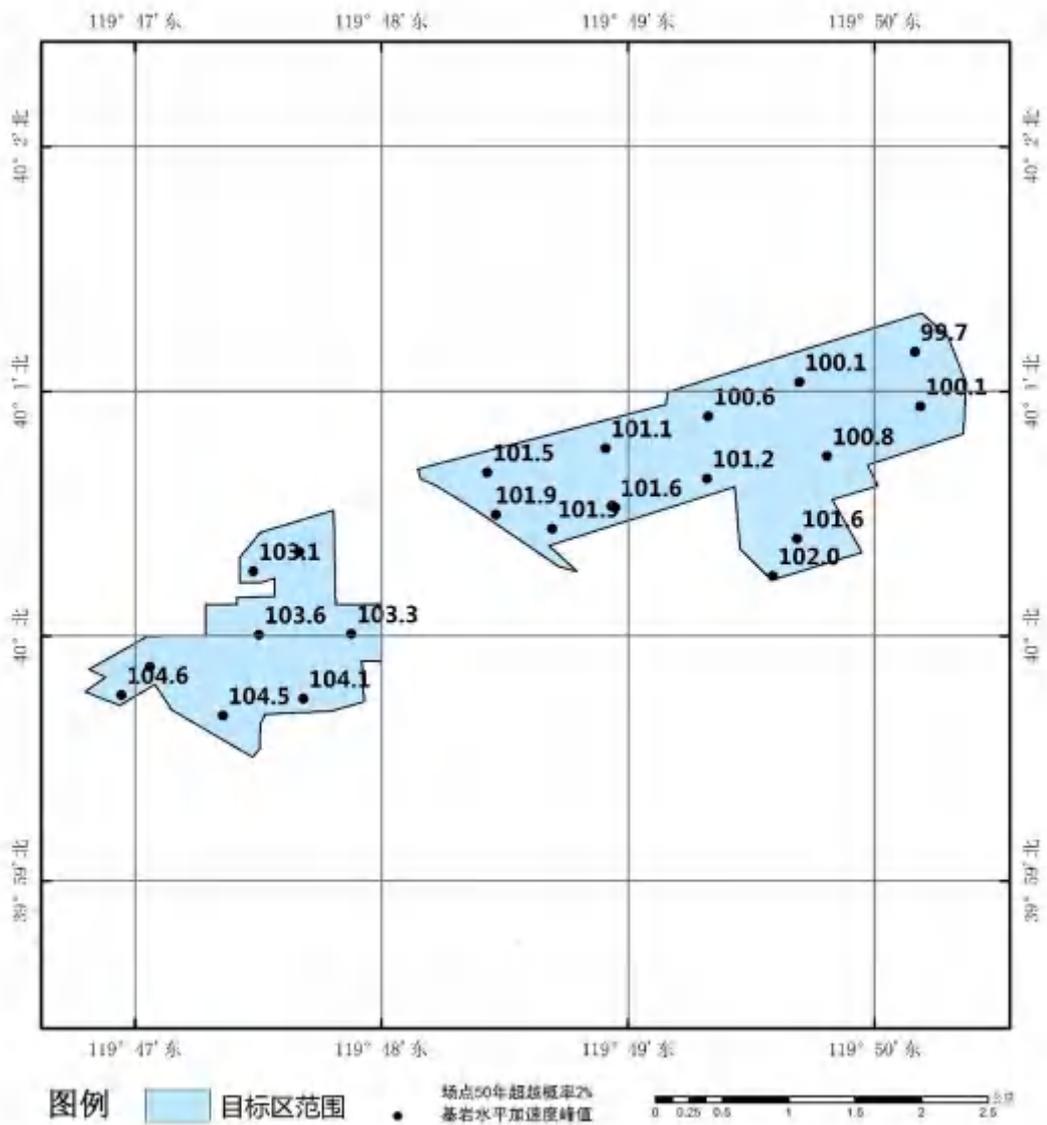


图 5.6.5C2 场点及相应基岩地震动峰值加速度分布图（50 年超越概率 2%）

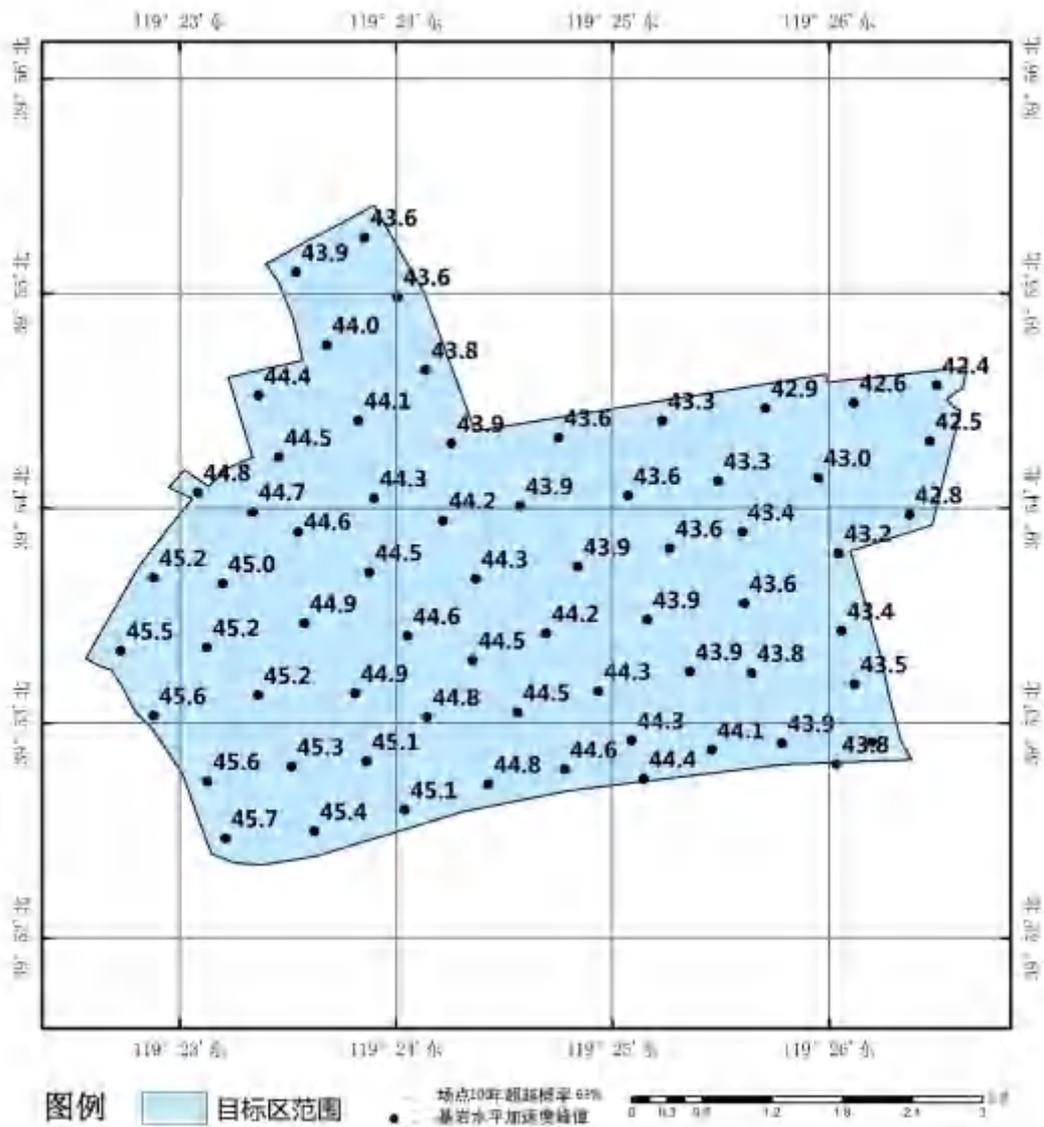


图 5.6.5D1 场点及相应基岩地震动峰值加速度分布图（100 年超越概率 63%）

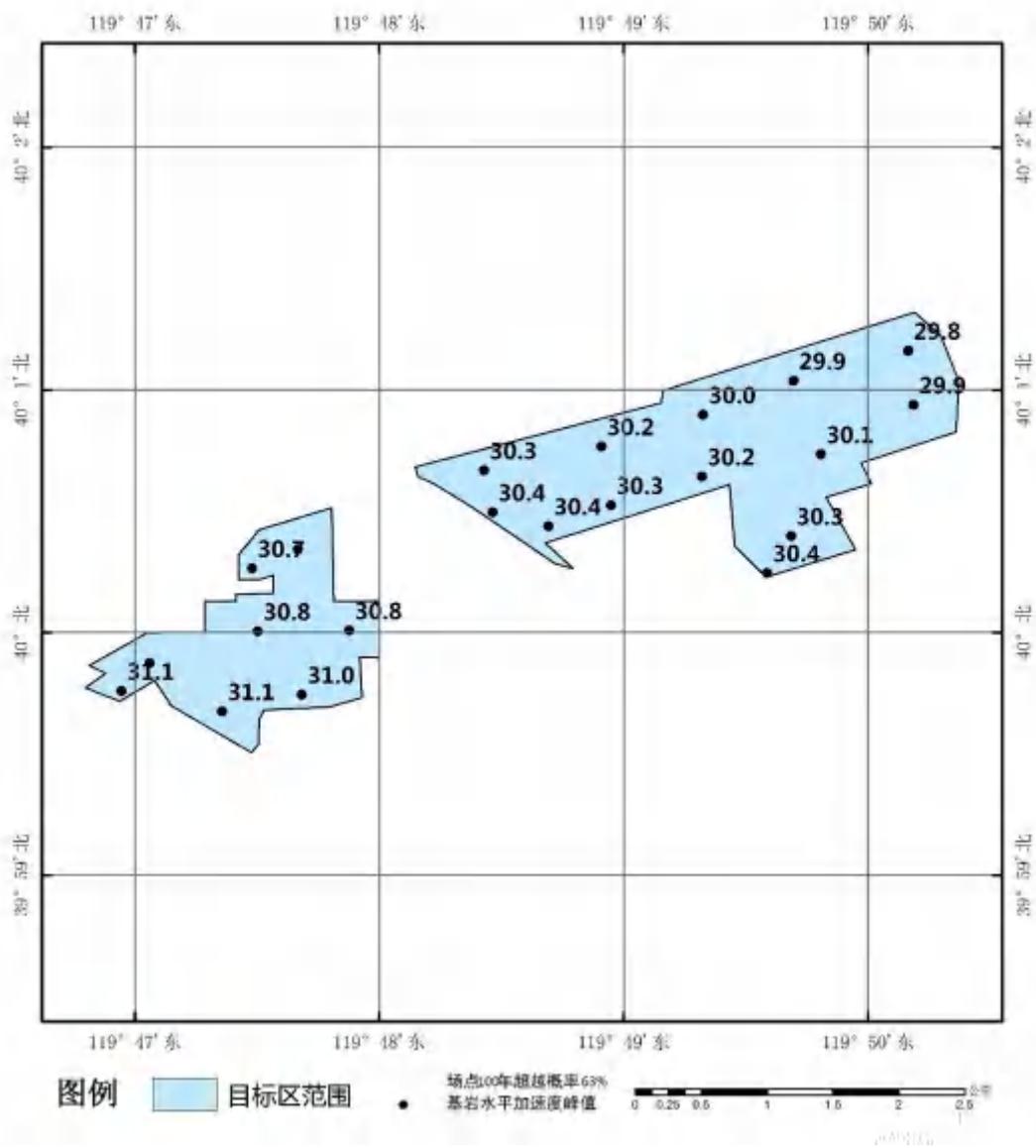


图 5.6.5D2 场点及相应基岩地震动峰值加速度分布图（100 年超越概率 63%）

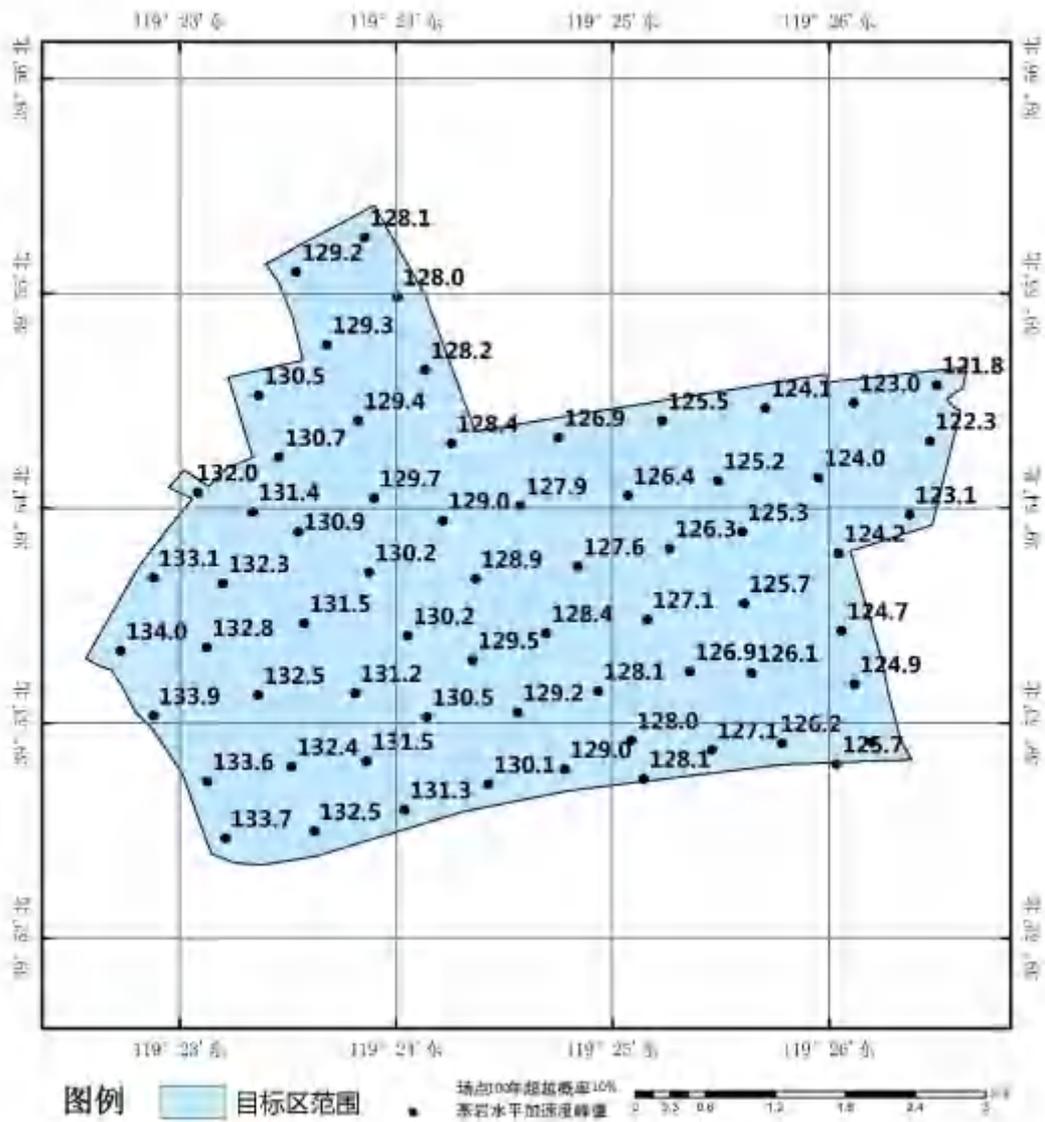


图 5.6.5E1 场点及相应基岩地震动峰值加速度分布图（100 年超越概率 10%）

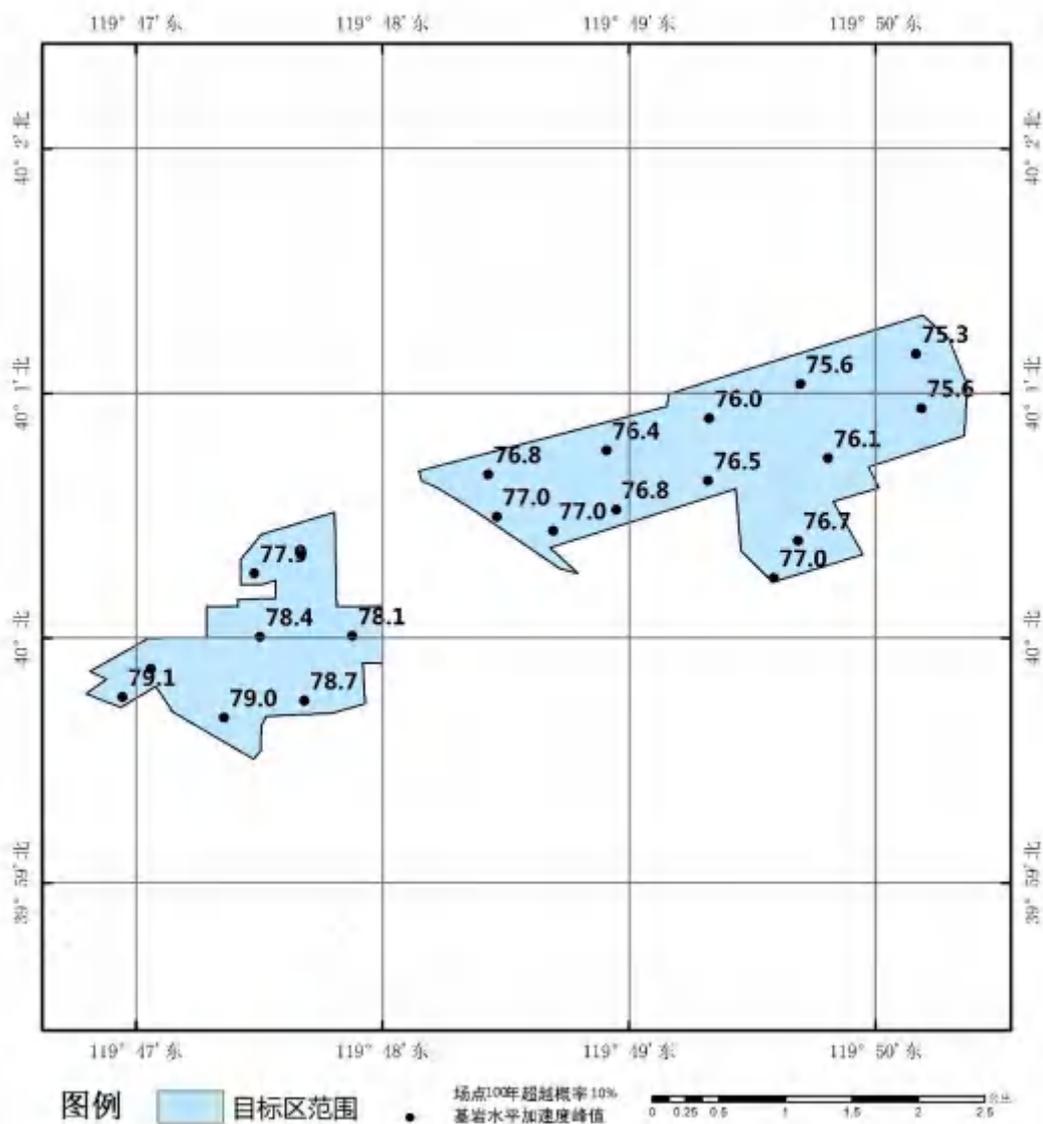


图 5.6.5E2 场点及相应基岩地震动峰值加速度分布图 (100 年超越概率 10%)

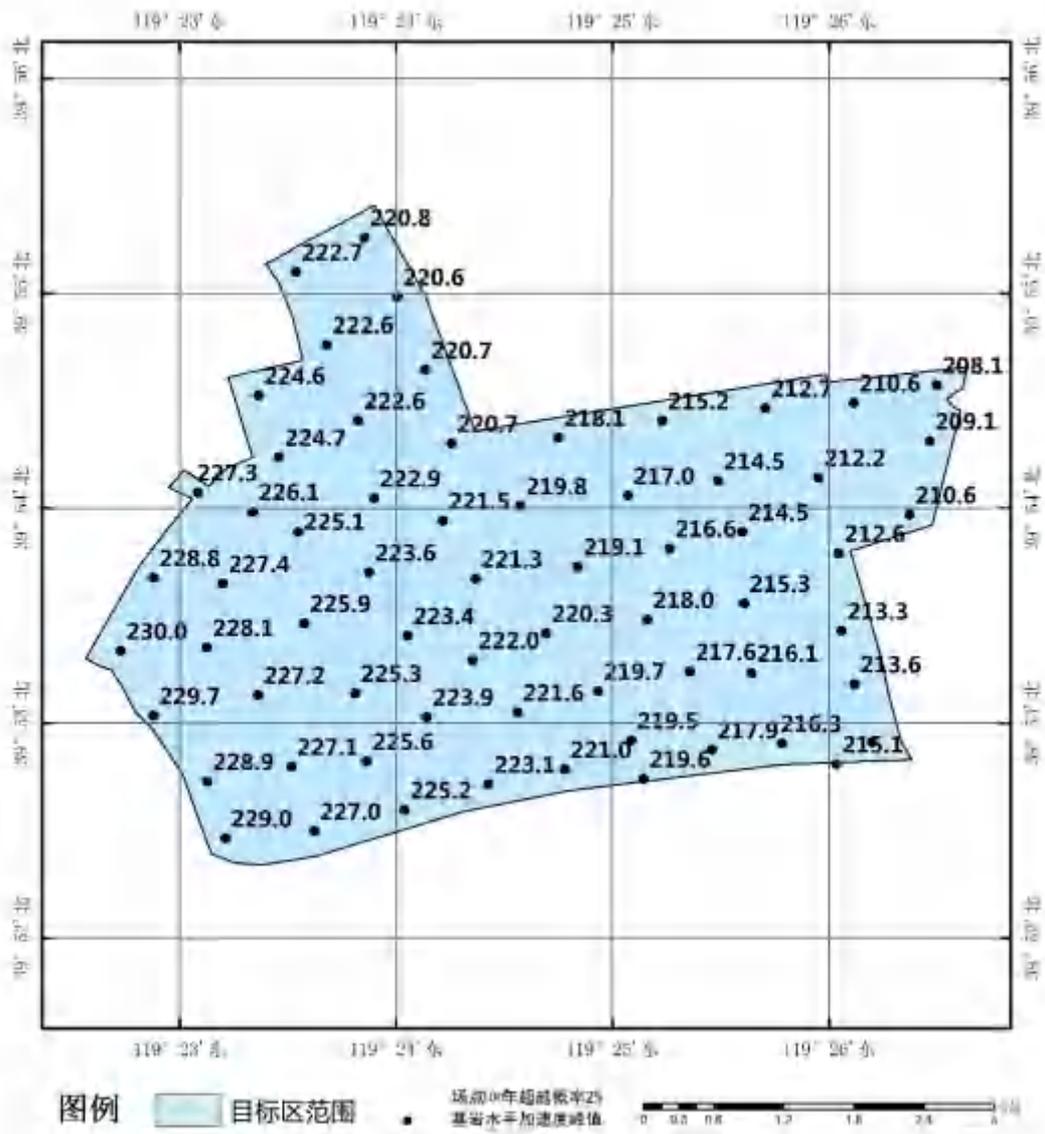


图 5.6.5F1 场点及相应基岩地震动峰值加速度分布图（100 年超越概率 2%）

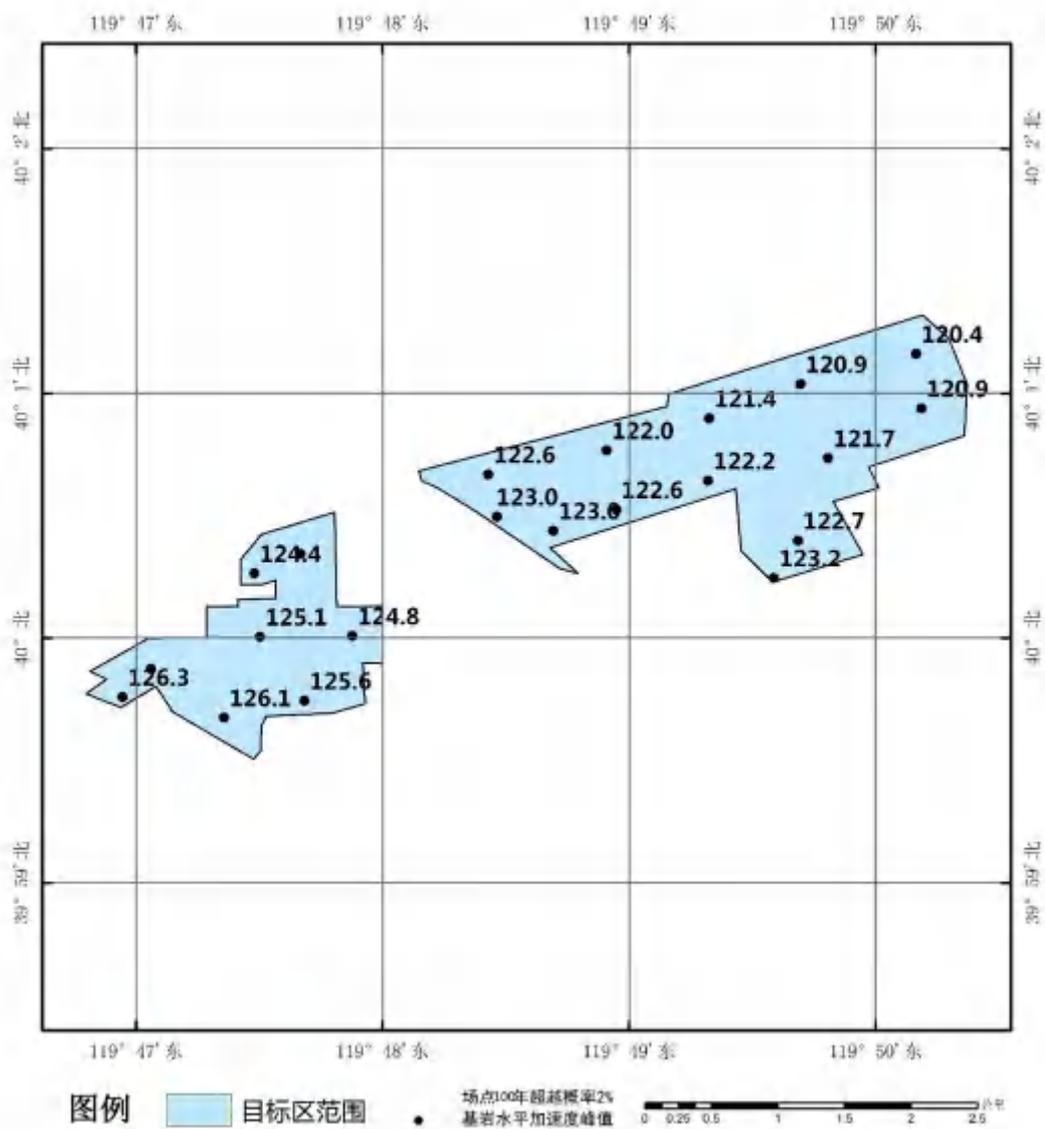


图 5.6.5F2 场点及相应基岩地震动峰值加速度分布图（100 年超越概率 2%）

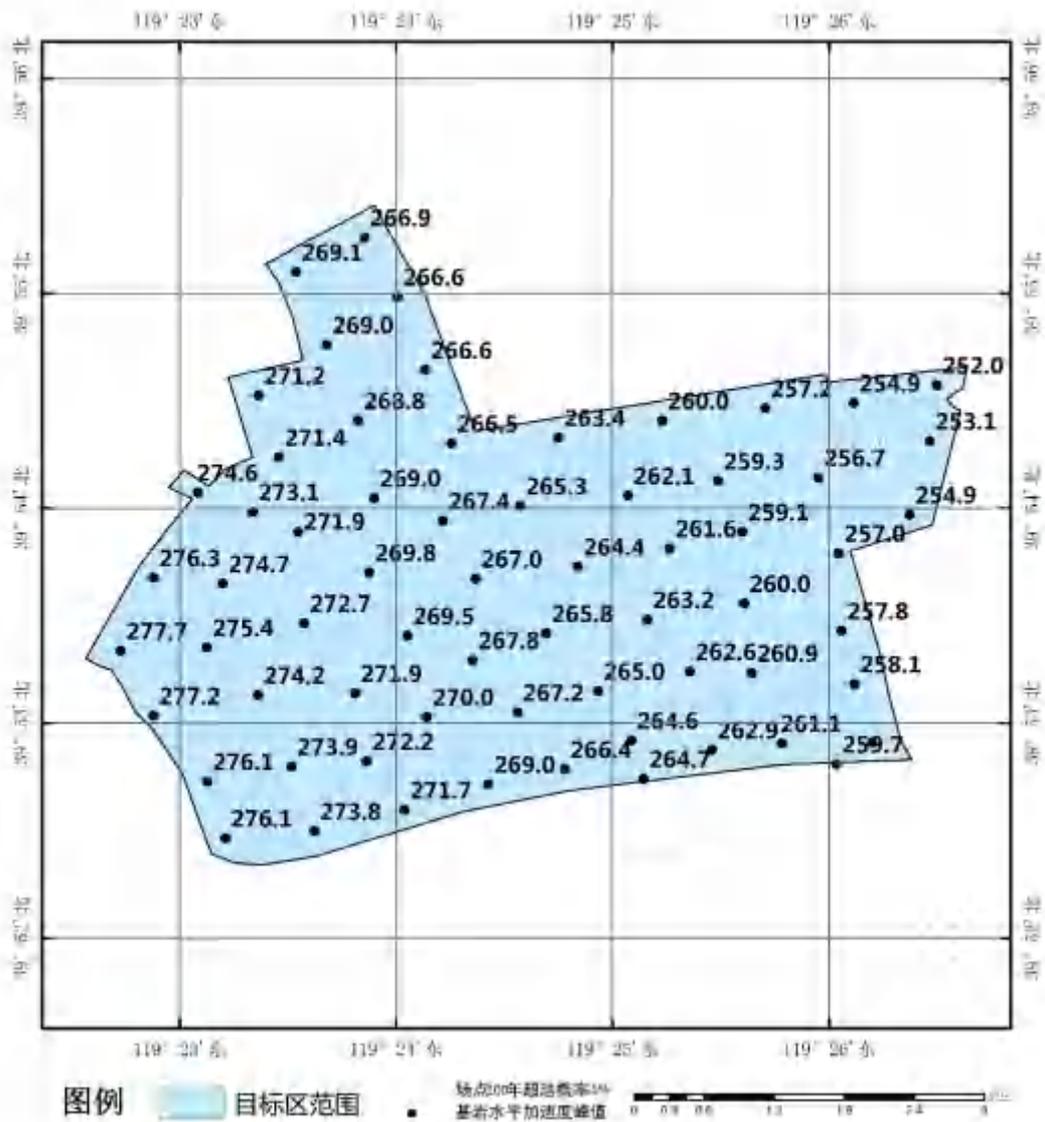


图 5.6.5G1 场点及相应基岩地震动峰值加速度分布图（年超越概率  $10^{-4}$ ）

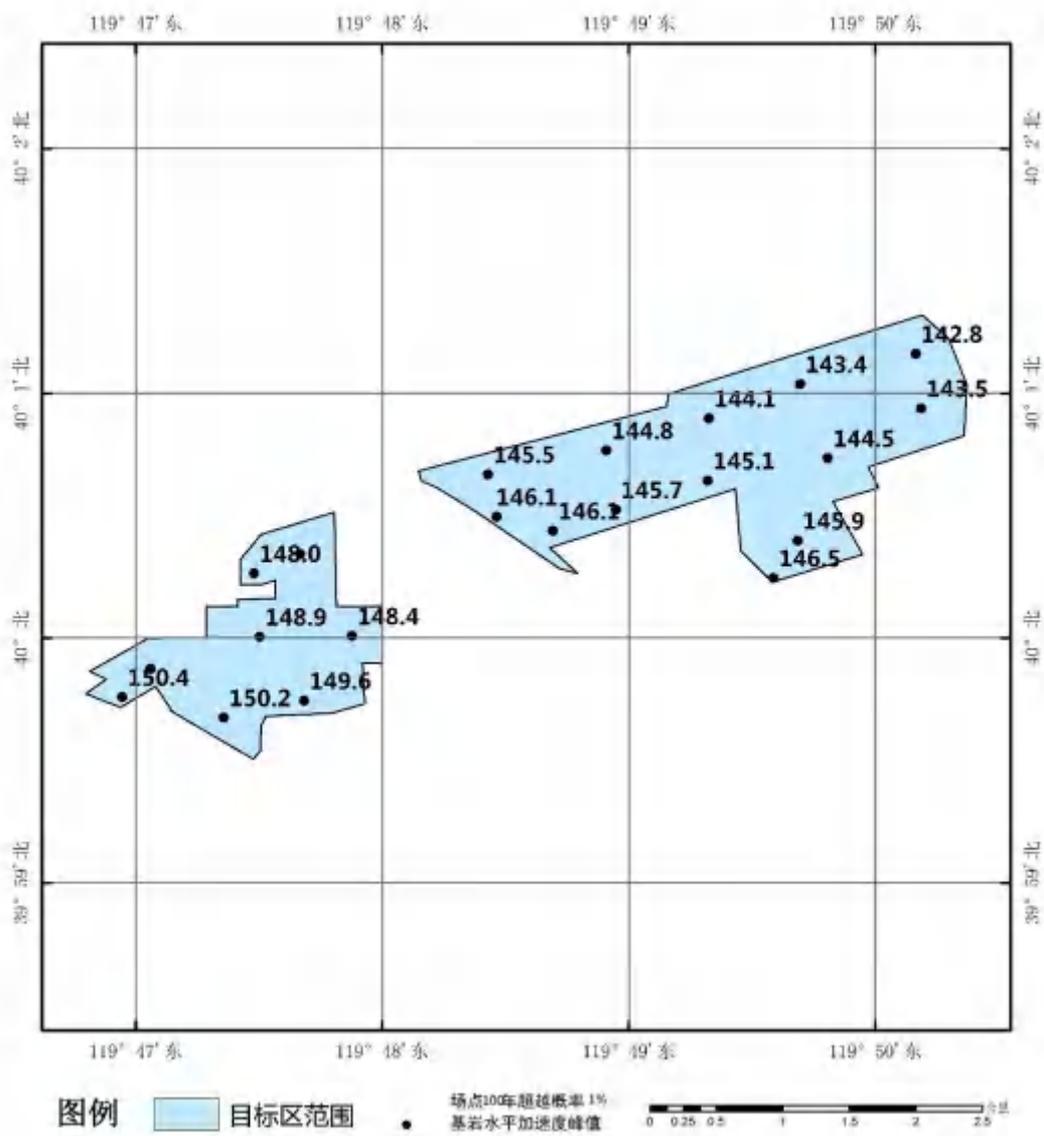


图 5.6.5G2 场点及相应基岩地震动峰值加速度分布图（年超越概率  $10^{-4}$ ）

## 第六章 场地地震动参数确定

本章内容主要包括基岩地震动输入确定，场地工程地质特征分析，场地力学模型建立，用一维等效线性化解法计算地表地震加速度峰值、反应谱等各项地震动参数，地震动参数转化成供抗震设计使用的地震影响系数等工作。

### 6.1 场地基岩的人造地震动时程

地震危险性分析给出了 7 个超越概率水平下的基岩地震反应谱，在本次工作中，根据地震危险性给出的基岩反应谱，人工构造地震动做为输入。

#### 6.1.1 原理及方法

基岩地震动人工合成是根据输入地震反应谱模拟地震动的时程过程，用加速度时程表示。加速度时程为一非平稳的随机过程，用三角级数迭加法模拟。

三角级数迭加法是用一组三角级数构造一个近似的高斯平稳过程，然后再乘以强度包络线函数得到一个非平稳的加速度时程曲线。表示为： $A(t)=f(t)x(t)$

$A(t)$ 为基岩地震动加速度曲线； $x(t)$ 为具有零均值和功率谱密度函数  $S(\omega)$ 的高斯平稳随机过程，用傅里叶级数表示为：

$$x(t) = \sum_{k=0}^n C_k \cos(\omega_k t + \varphi_k)$$

其中  $\varphi_k$  为  $(0, 2\pi)$  区间内均匀分布的随机相角， $C_k$  与  $\omega_k$  是三角级数第  $k$  个分量的幅值和频率；

$f(t)$ 是包络线函数，常称为渐进非平稳过程，用以考虑加速度的非平稳性，表示为：

$$f(t) = \begin{cases} \left(\frac{t}{t_1}\right)^2 & 0 \leq t < t_1 \\ 1 & t_1 \leq t < t_2 \\ e^{-C(t-t_2)} & t \geq t_2 \end{cases}$$

其中参数  $t_1$ 、 $t_2$ 、 $C$  依据地震危险性分析结果，选用以下经验关系确定：

$$\lg t_1 = -1.074 + 1.005 \lg(R+10)$$

$$\lg(t_2 - t_1) = -2.268 + 0.3262M + 0.5815 \lg(R+10)$$

$$\lg C = 1.941 - 0.2817M - 0.567 \lg(R+10)$$

式中  $M$  为等效震级， $R$  为等效震中距，均由地震危险性分析结果给出。考虑到对目标区地震危险性分析影响较大的潜在震源的震级上限和离开目标区的距离，综合研究确定基岩水平向地震动加速度时程的形状函数。考虑到本项目东、西区相距较远又不在同一地震动区划，东、西区地震动持时参数分别给出。最终

确定的地震动持时参数见表 6.1.1。

表 6.1.1A 西区地震动持时参数表

持时参数	M	R (km)	t <sub>1</sub> (sec)	t <sub>2</sub> (sec)	C
50 年超越概率 63%	5.98	48.9	5.07	10.21	0.179
50 年超越概率 10%	6.57	38.7	4.19	11.37	0.140
50 年超越概率 2%	6.98	42.0	4.47	14.63	0.100
100 年超越概率 63%	6.38	44.0	4.64	11.25	0.150
100 年超越概率 10%	6.67	35.8	3.94	11.42	0.130
100 年超越概率 2%	7.12	38.0	4.13	14.90	0.096
100 年超越概率 1%	7.30	51.2	5.25	21.72	0.065

表 6.1.1B 东区地震动持时参数表

持时参数	M	R (km)	t <sub>1</sub> (sec)	t <sub>2</sub> (sec)	C
50 年超越概率 63%	5.48	55.9	5.68	9.45	0.232
50 年超越概率 10%	6.17	48.7	5.05	10.98	0.159
50 年超越概率 2%	6.48	48.0	4.99	12.43	0.131
100 年超越概率 63%	5.98	44.0	4.65	9.54	0.188
100 年超越概率 10%	6.30	39.8	4.28	10.23	0.160
100 年超越概率 2%	6.80	55.0	5.60	15.70	0.099
100 年超越概率 1%	7.10	61.2	6.12	19.44	0.078

因被模拟的地震波谱特征用加速度反应谱来表示，而  $x(t)$  函数为傅里叶级数，二者需利用“功率谱”统一起来。

(1) 反应谱与功率谱之间存在近似转换关系：

$$S(\omega) = \frac{\xi}{\pi\omega} \cdot \frac{[S_a^T(\omega)]^2}{\ln\left[\frac{-\pi}{\omega T} \ln(1-P)\right]}$$

式中  $S_a^T(\omega)$  给定的目标反应谱， $\xi$  为阻尼比， $P$  为反应超越概率。

(2) 傅立叶系数  $C_k$  与功率谱密度函数的关系为：

$$C_k = [4 \cdot S(\omega_k) \cdot \Delta\omega]^{1/2}。$$

(3) 由上式进行傅立叶反变换求得  $x(t)$ ，实际计算中采用快速傅立叶变换技术 (FFT)：

$$x(t) = \sum_{k=0}^n C(\omega_k) e^{i\omega_k t}$$

其中  $C(\omega_k) = FS(\omega_k) e^{i\varphi_k}$ ， $FS(\omega_k)$  为振幅谱； $\varphi_k$  为相位谱，并假定其在  $(0, 2\pi)$  之间均匀分布。

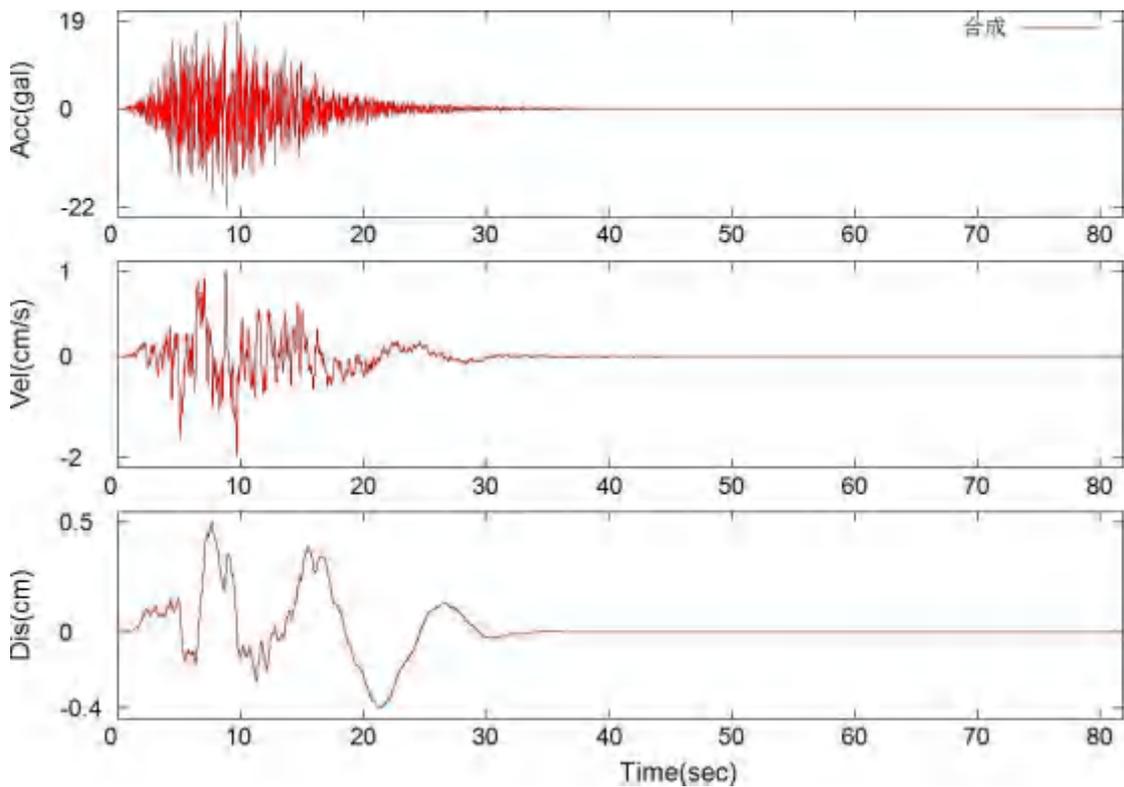
因反应谱与功率谱之间的转换为近似的，因此，第一次计算得到的  $X(t)$  反应谱与目标反应谱有一定距离，为提高合成程度，可采用反复迭代的方法，即

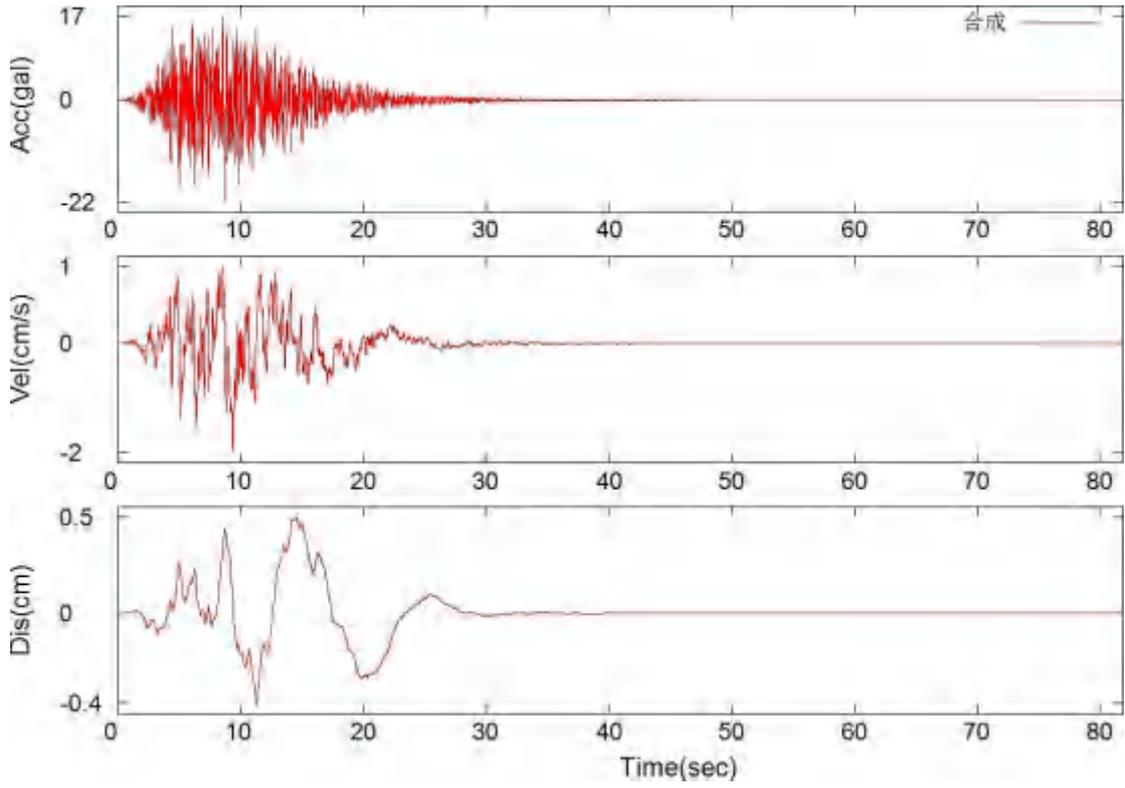
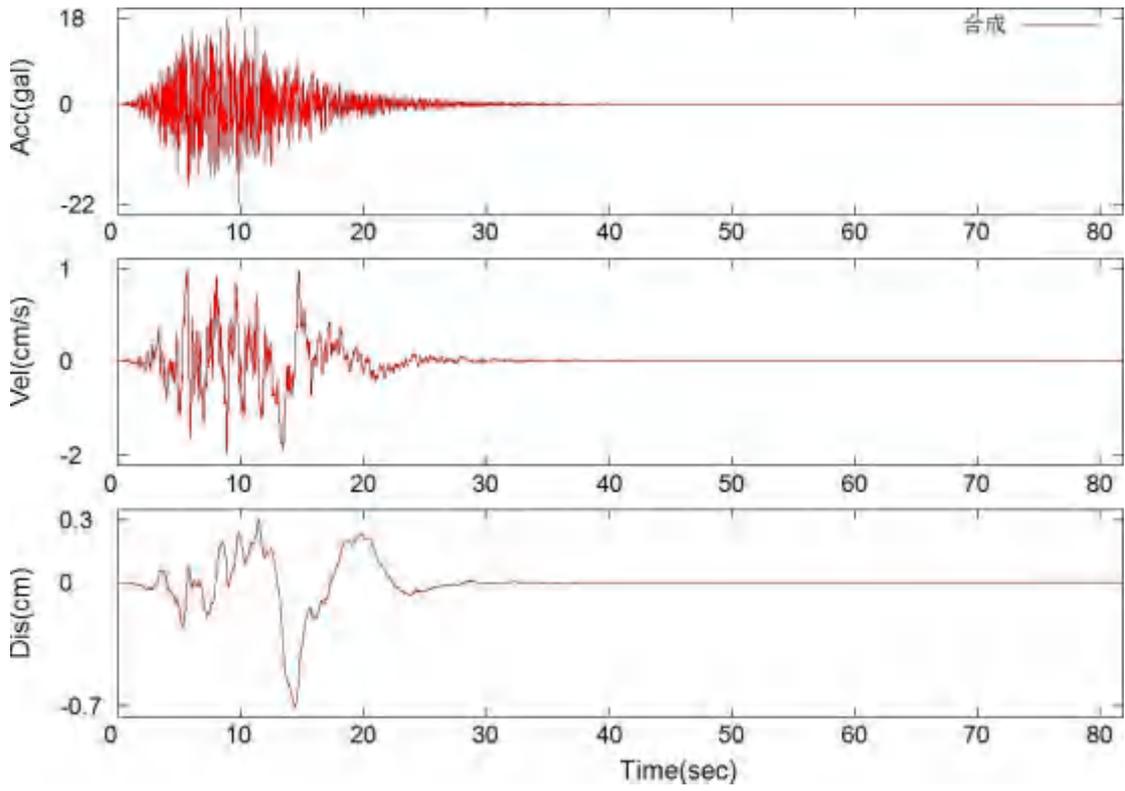
$$FS^{i+1}(\omega_k) = \frac{S_a^T(\omega_k)}{S_a(\omega_k)} \cdot FS^i(\omega_k)$$

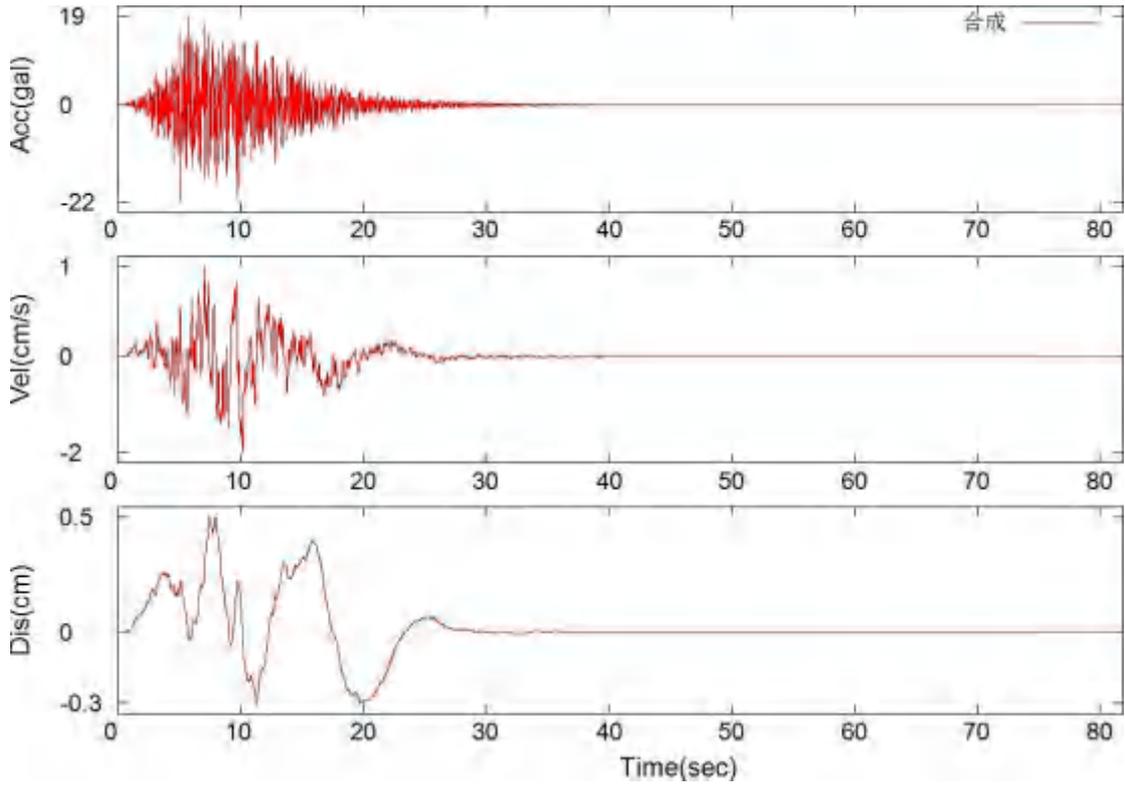
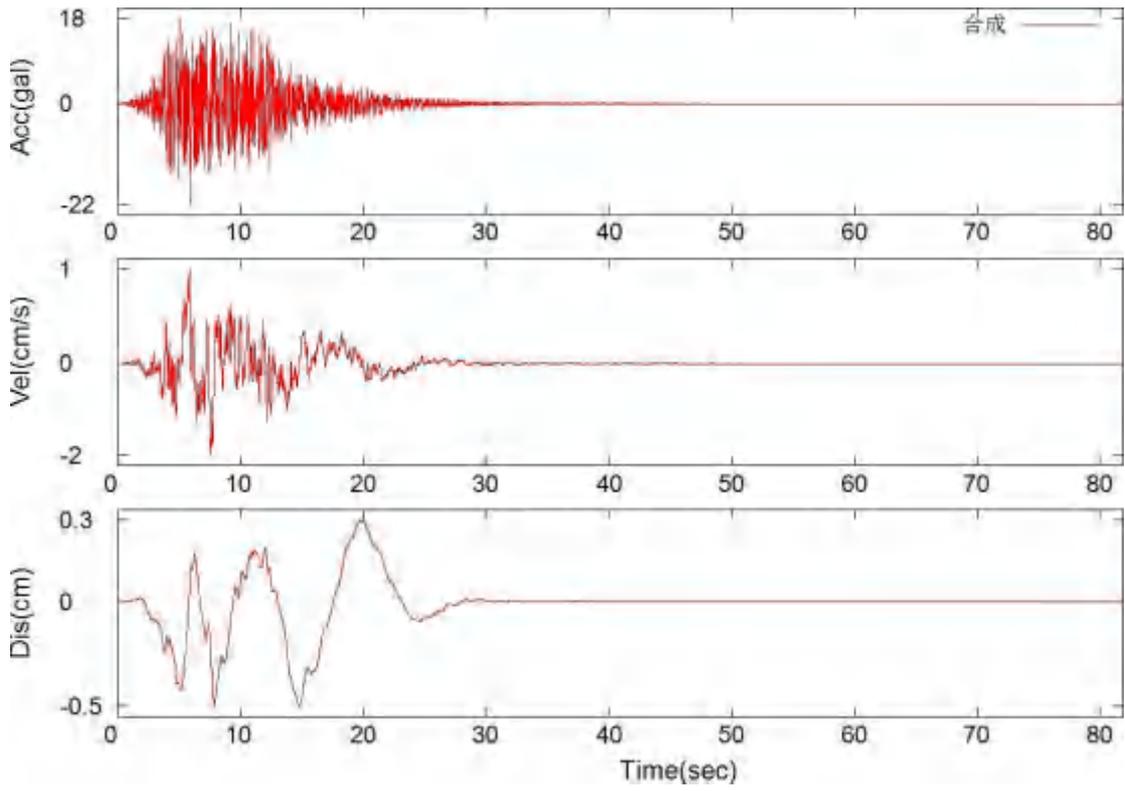
两次迭代的误差小于 5% 时可以认为满足精度要求了。

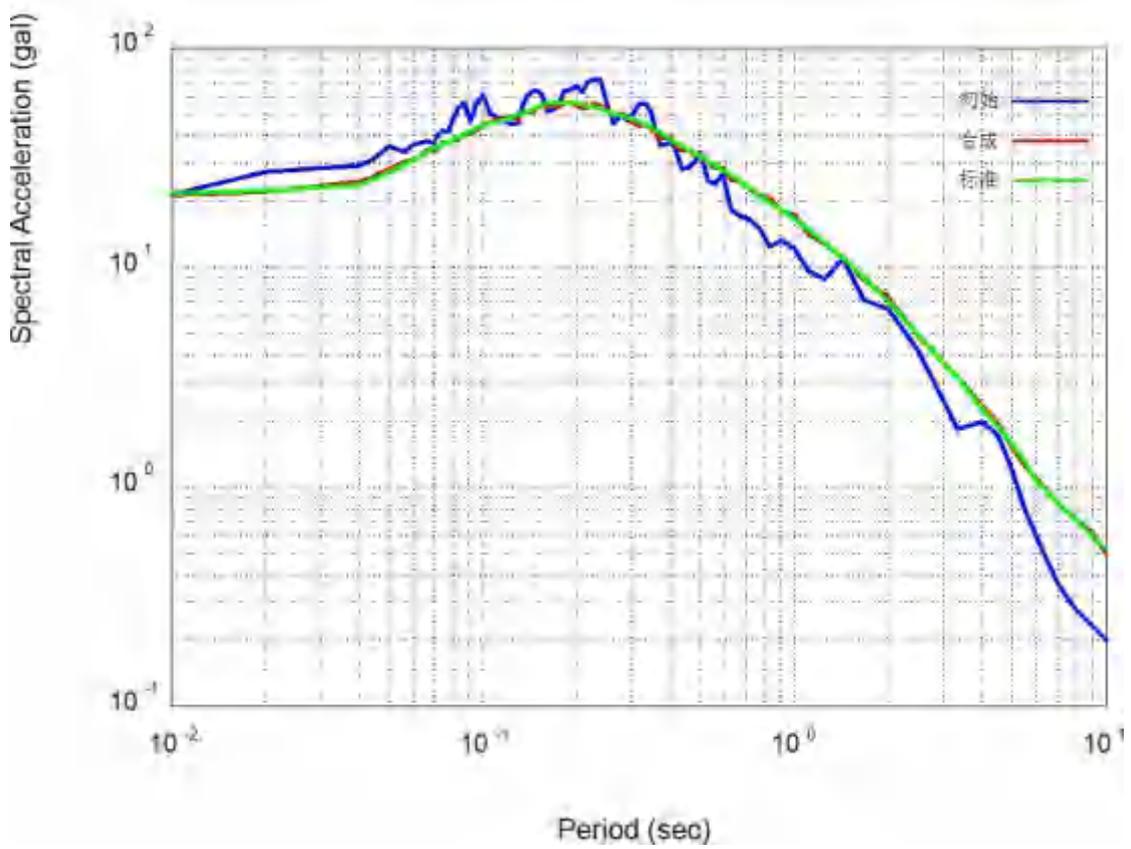
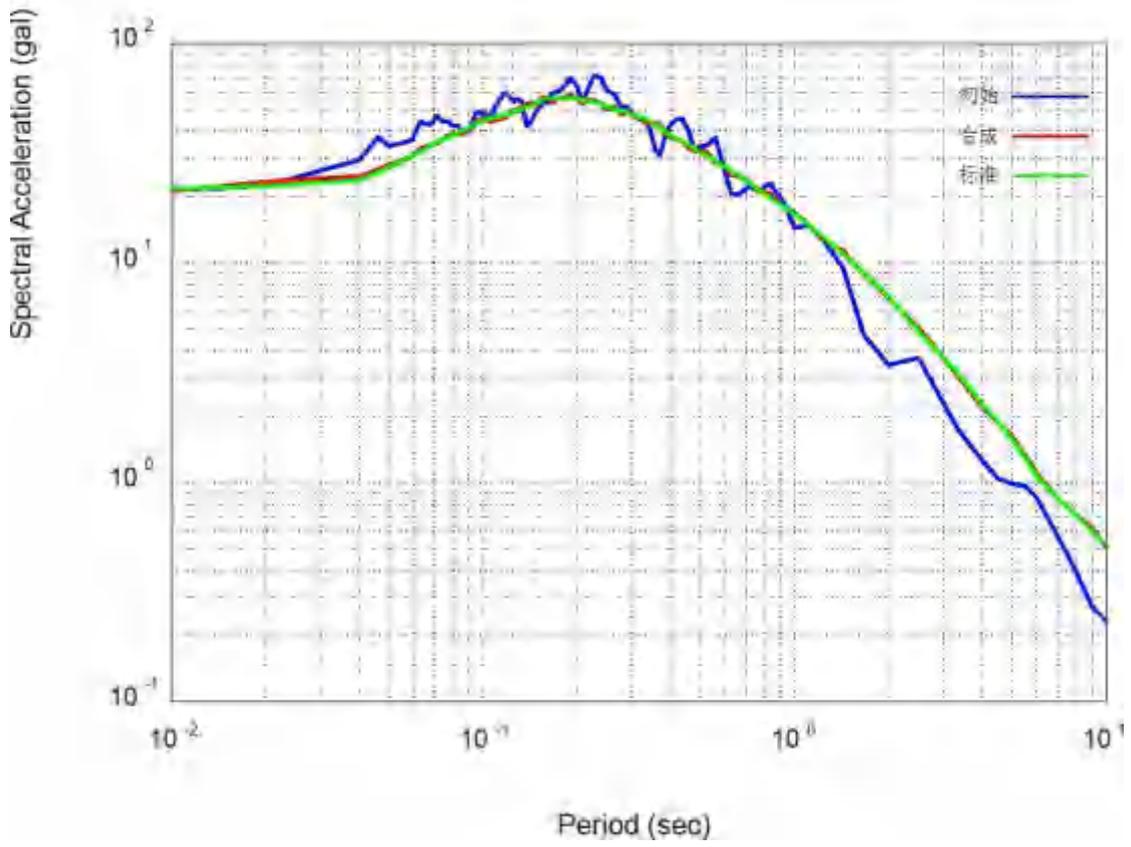
### 6.1.2 基岩地震动时程合成

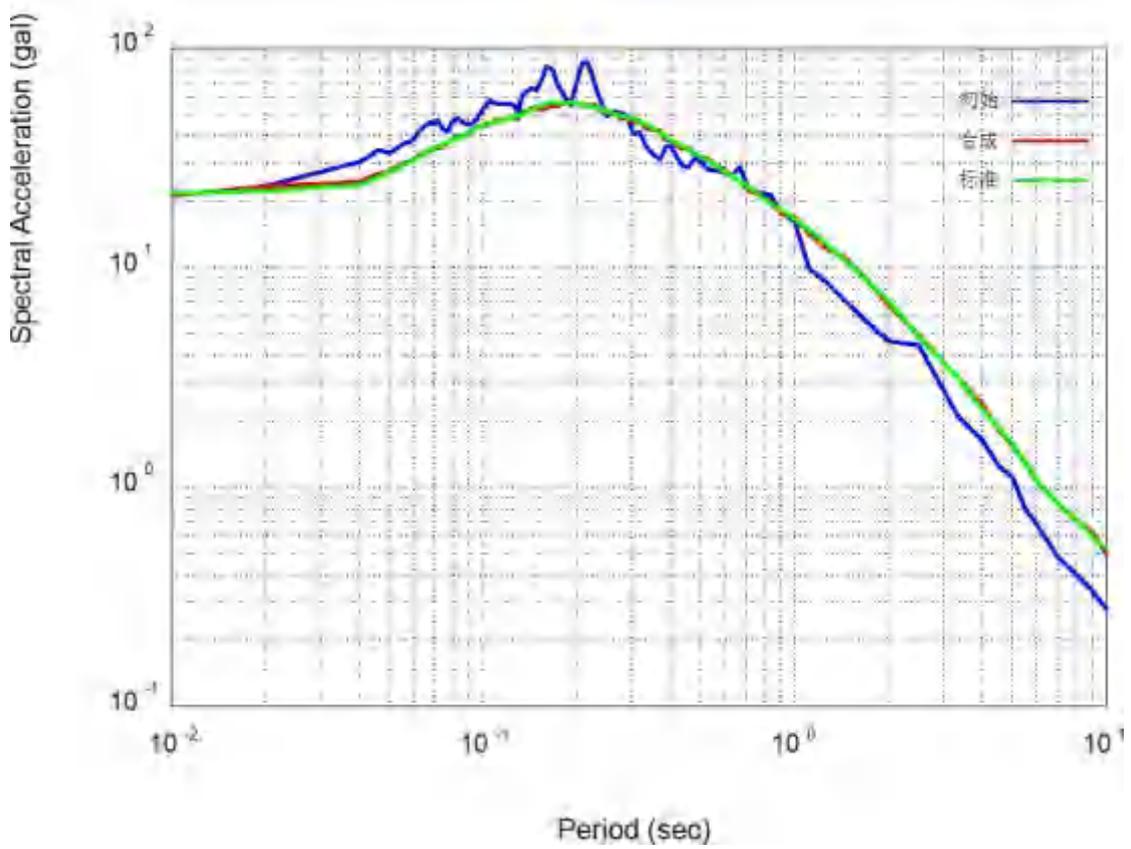
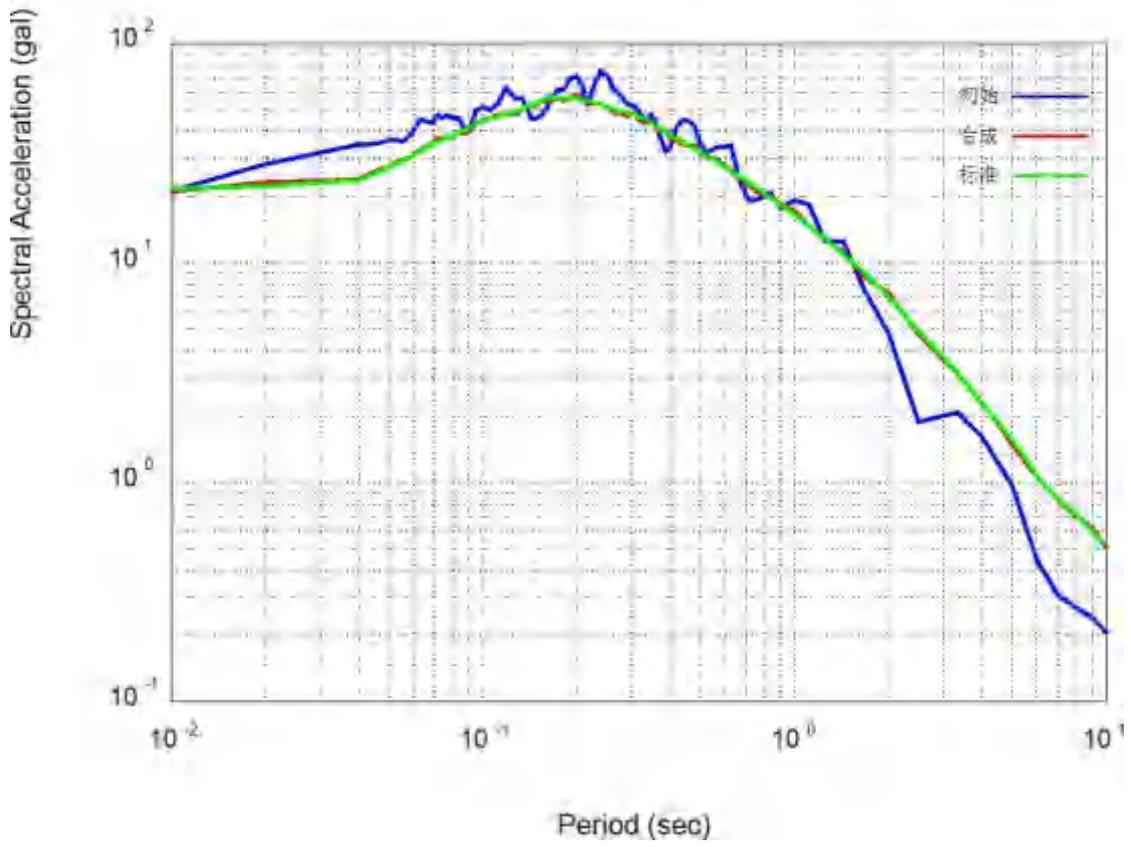
由于目标区面积较小，且从概率地震危险性分析章节中基岩地震动峰值加速度分布图可知，概率地震危险性计算所得目标区内不同计算孔的基岩水平向地震动峰值加速度相差较小，反应谱基本一致。本报告取目标区计算峰值加速度最大值所对应的控制孔处不同概率水准的反应谱作为目标谱，分别提供 7 个概率水准的基岩地震动水平向加速度时程，每概率水准提供 5 条基岩加速度时程，不同地震动时程样本之间的相关系数小于 0.16，且在任一控制点频率处，合成地震动时程反应谱与目标地震反应谱之间的相对误差的绝对值小于 5%，合成地震动加速度时程对应的速度和位移时程无基线漂移在计算中，时间步长为 0.01s，在周期 0.04s 至 10s 之间，共设 81 个目标谱拟合控制点。各计算控制孔的基岩地震动水平向加速度时程的加速度峰值根据地震危险性分析结果进行调整。限于篇幅，报告中只给出了的基岩加速度、速度、位移时程及拟合反应谱曲线与目标谱的对比图曲线（东区 zk64、西区 zk01），如图 6.1.1 所示。











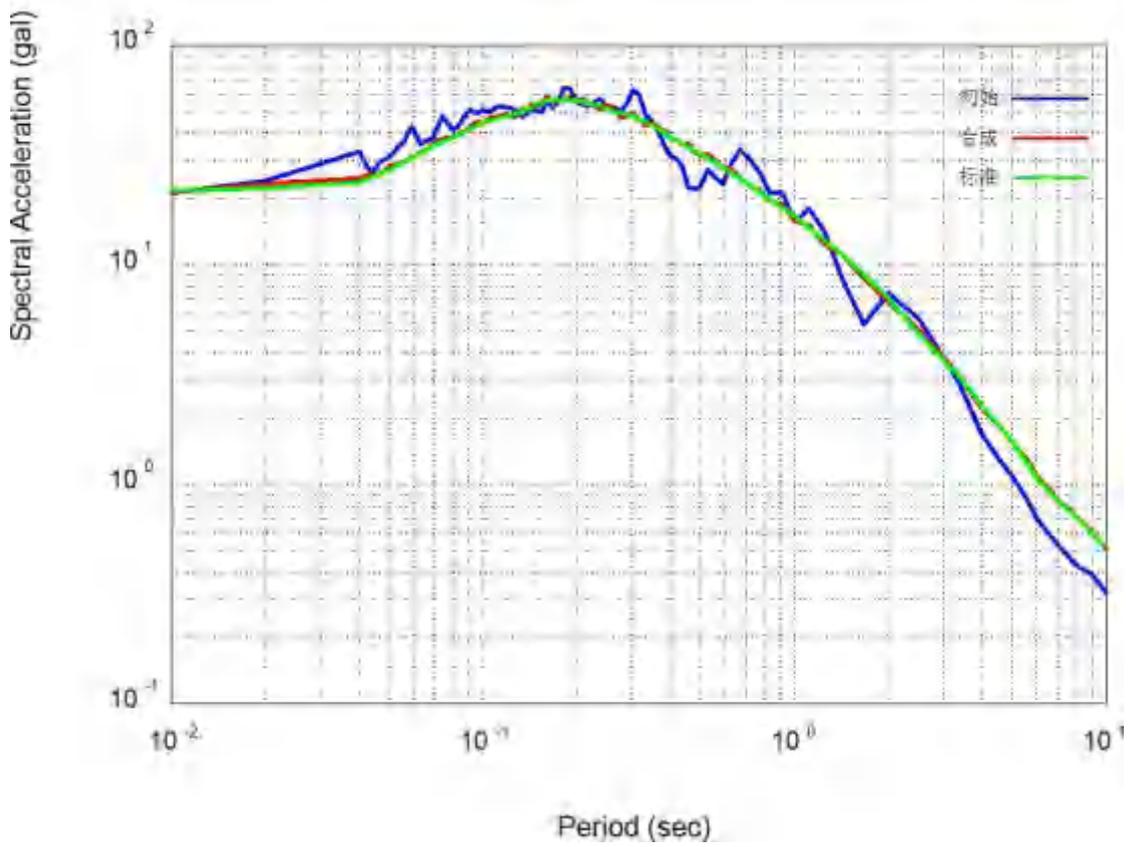
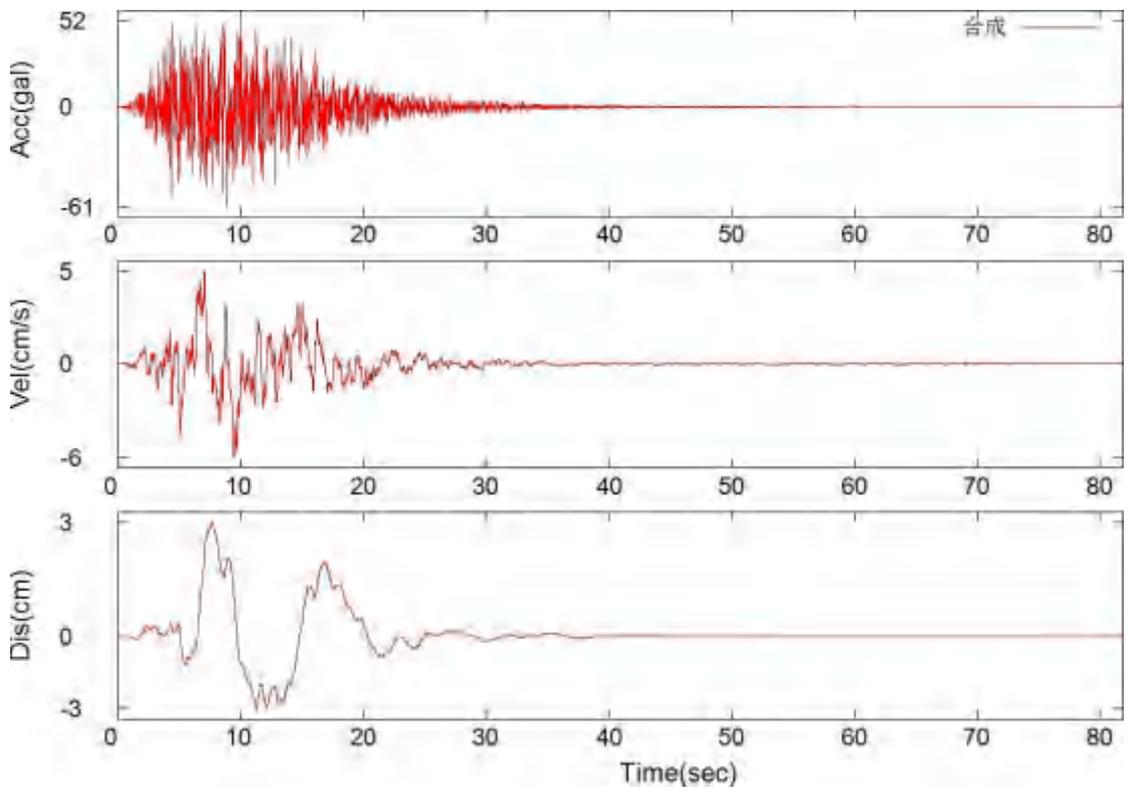
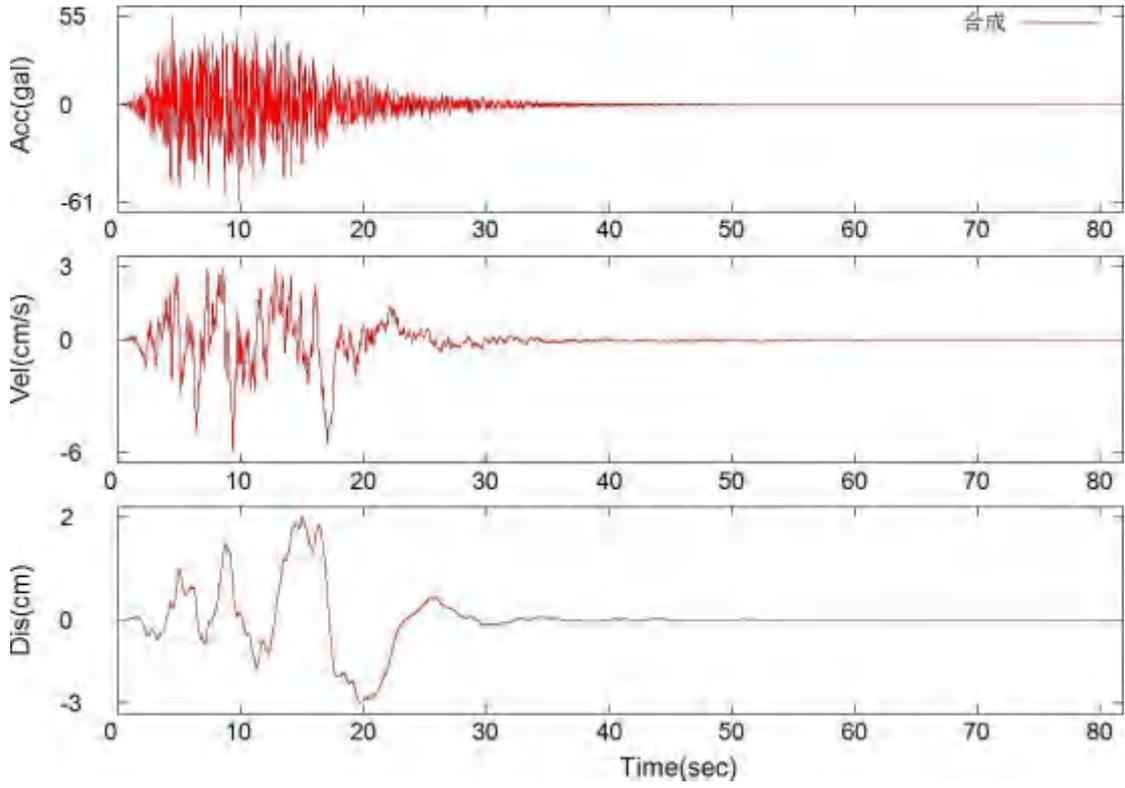
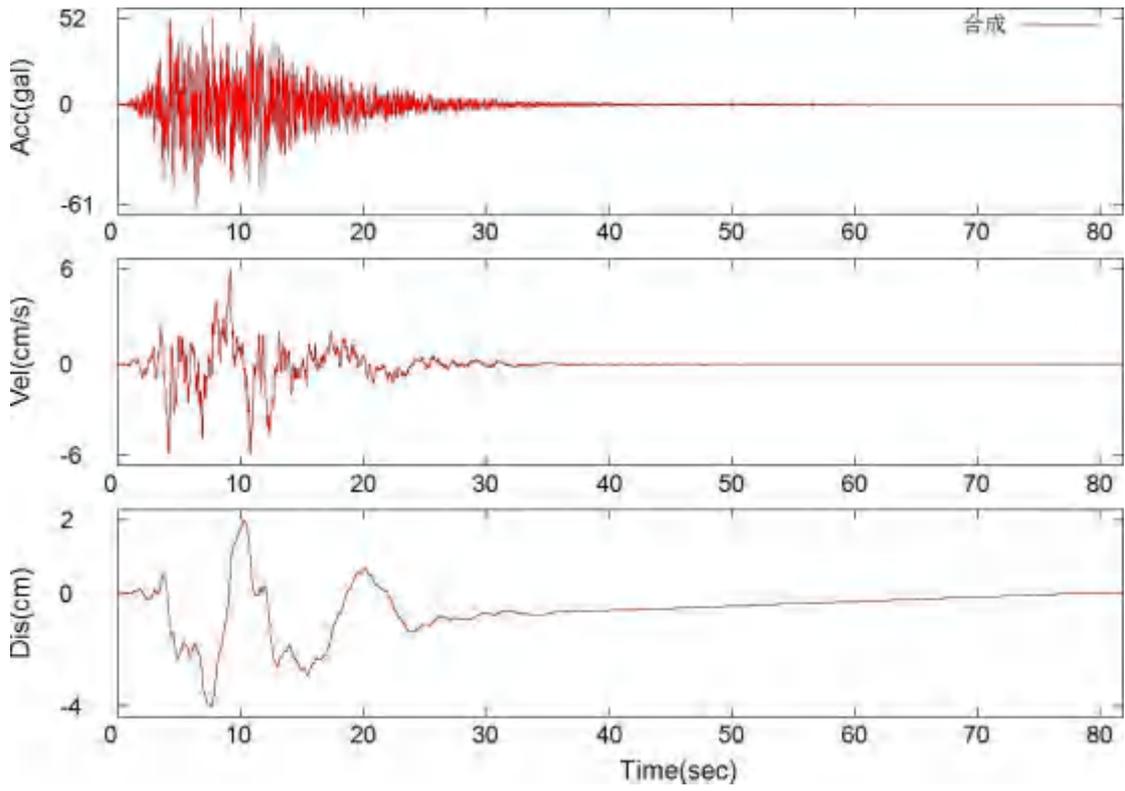
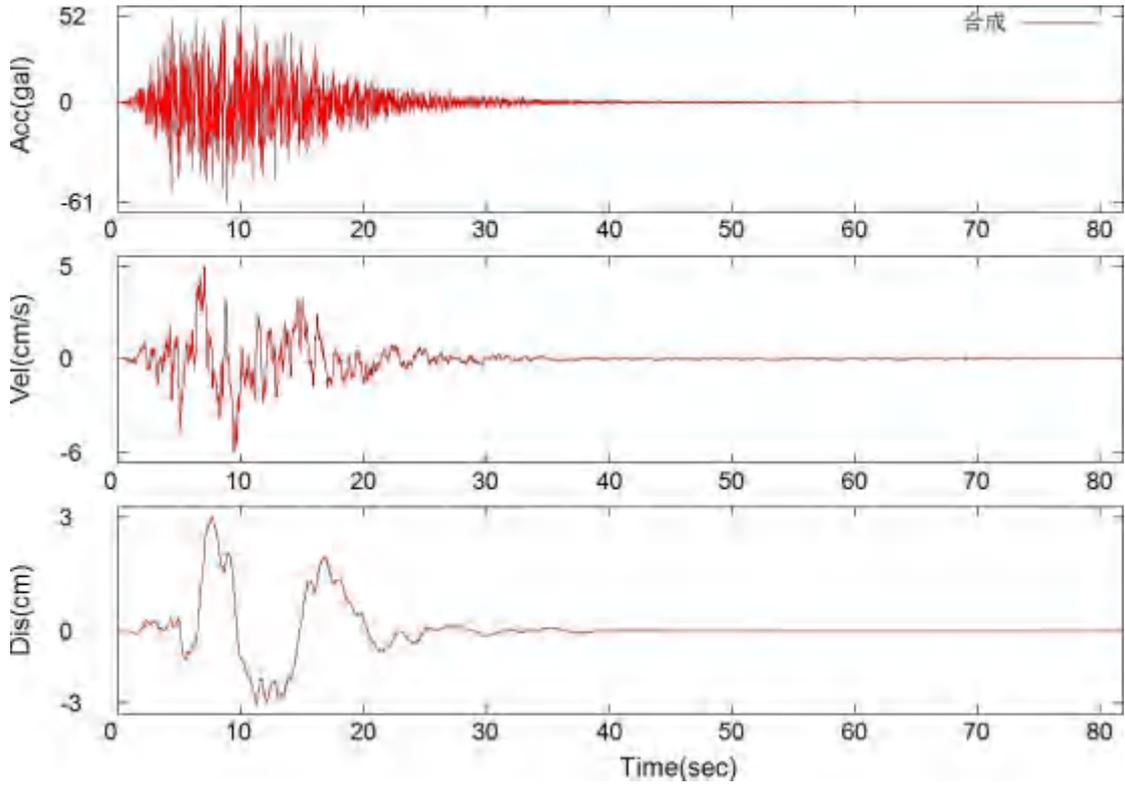
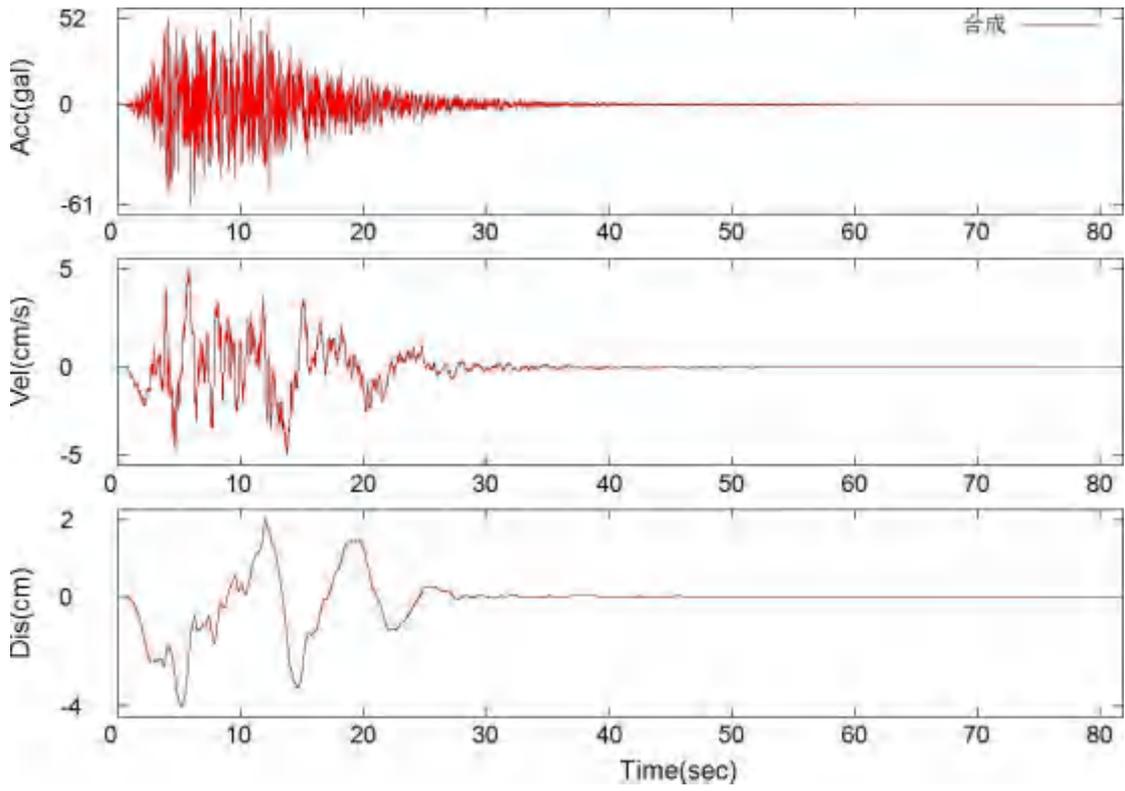
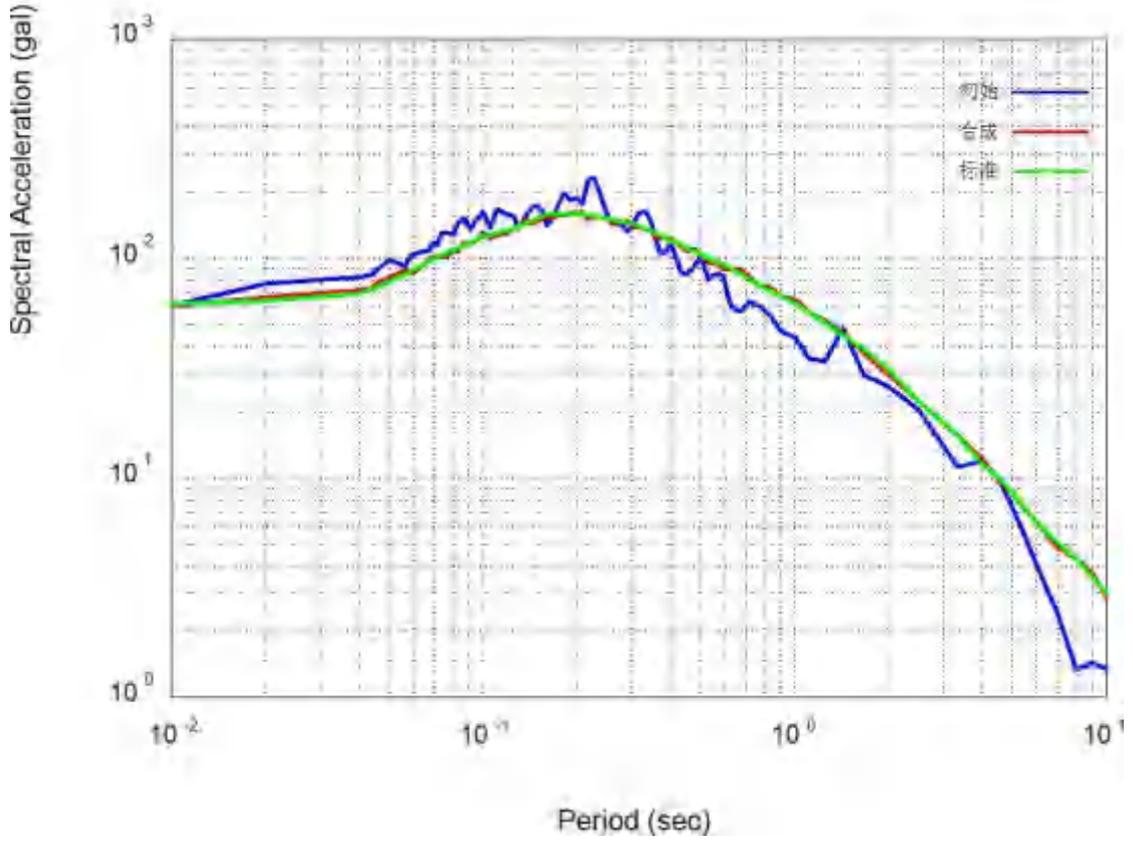
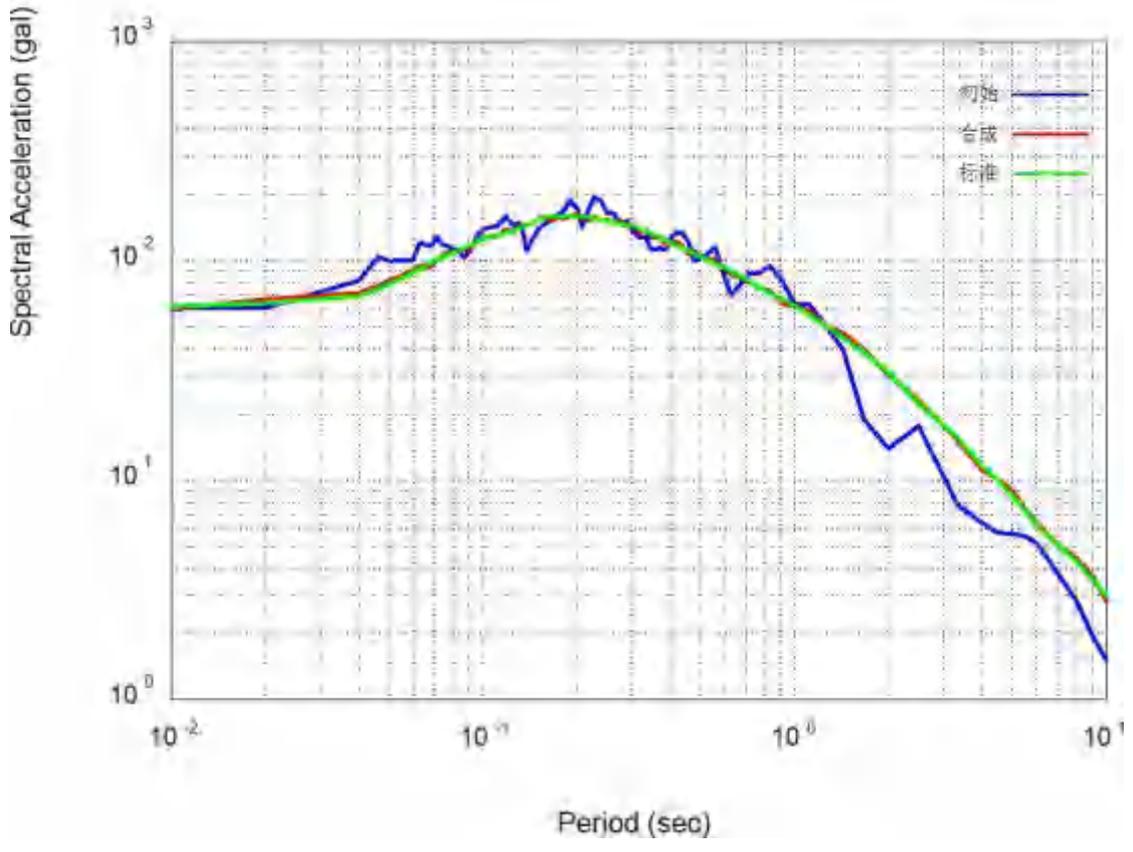


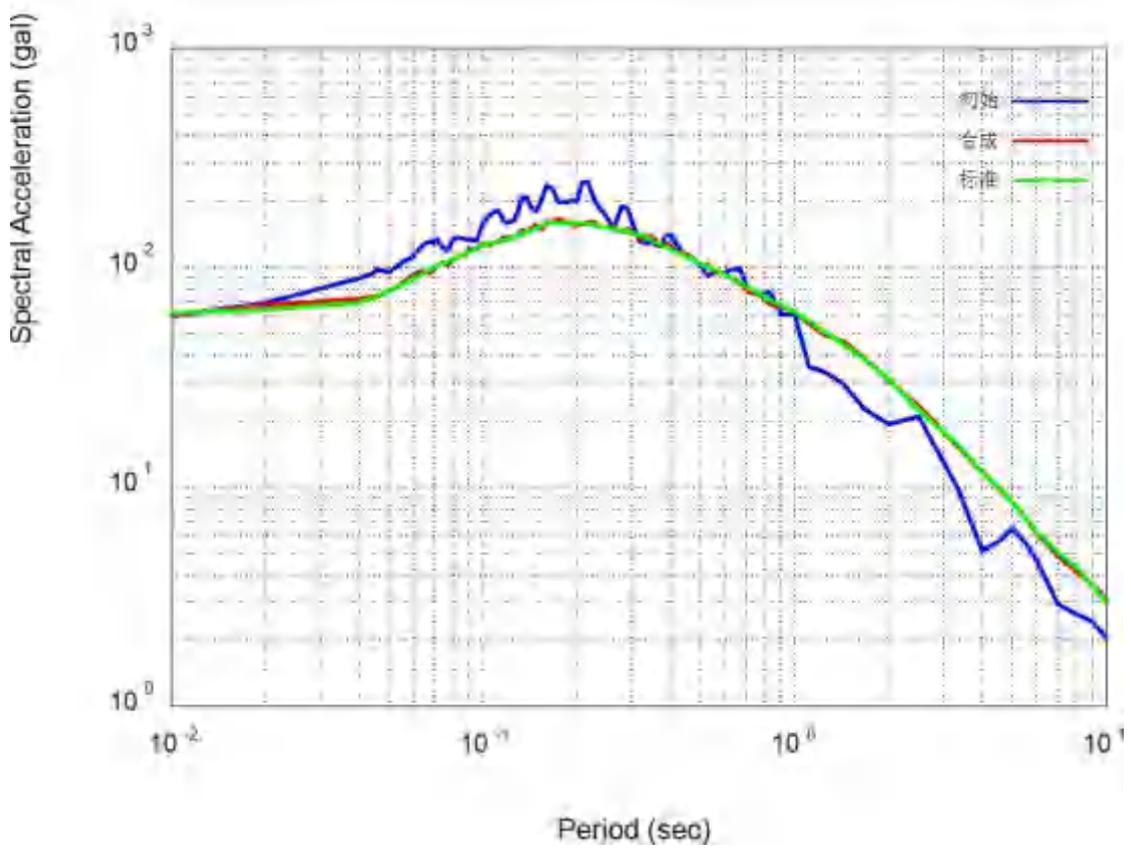
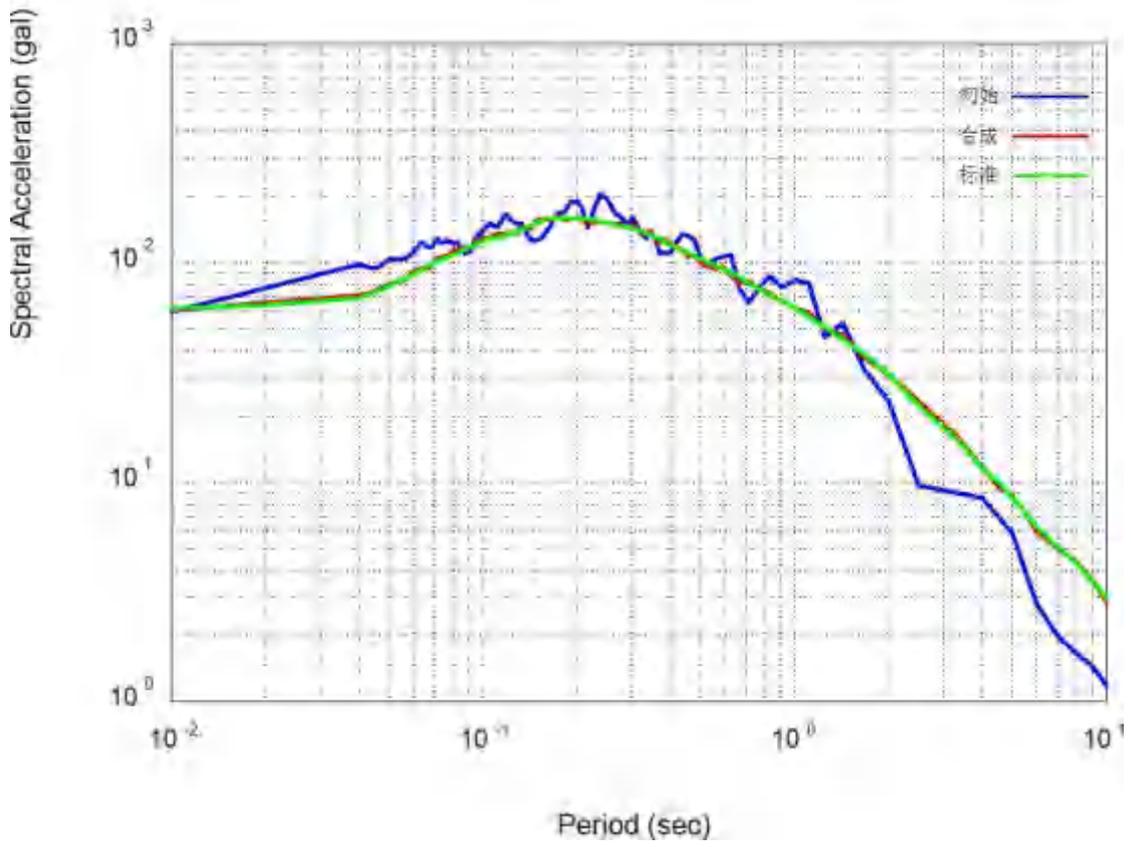
图 6.1.1A (xk64)基岩加速度、速度、位移及拟合反应谱曲线与目标谱的对比图 (50 年超越概率 63%)











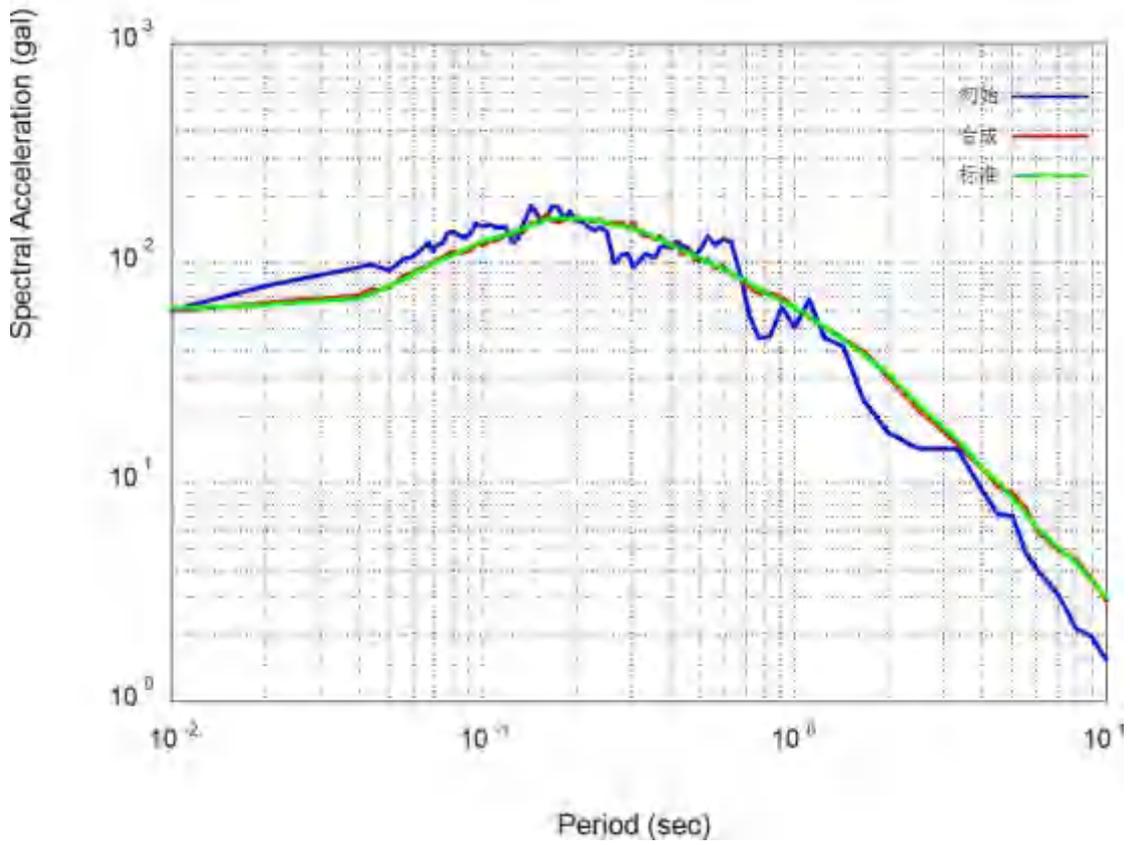
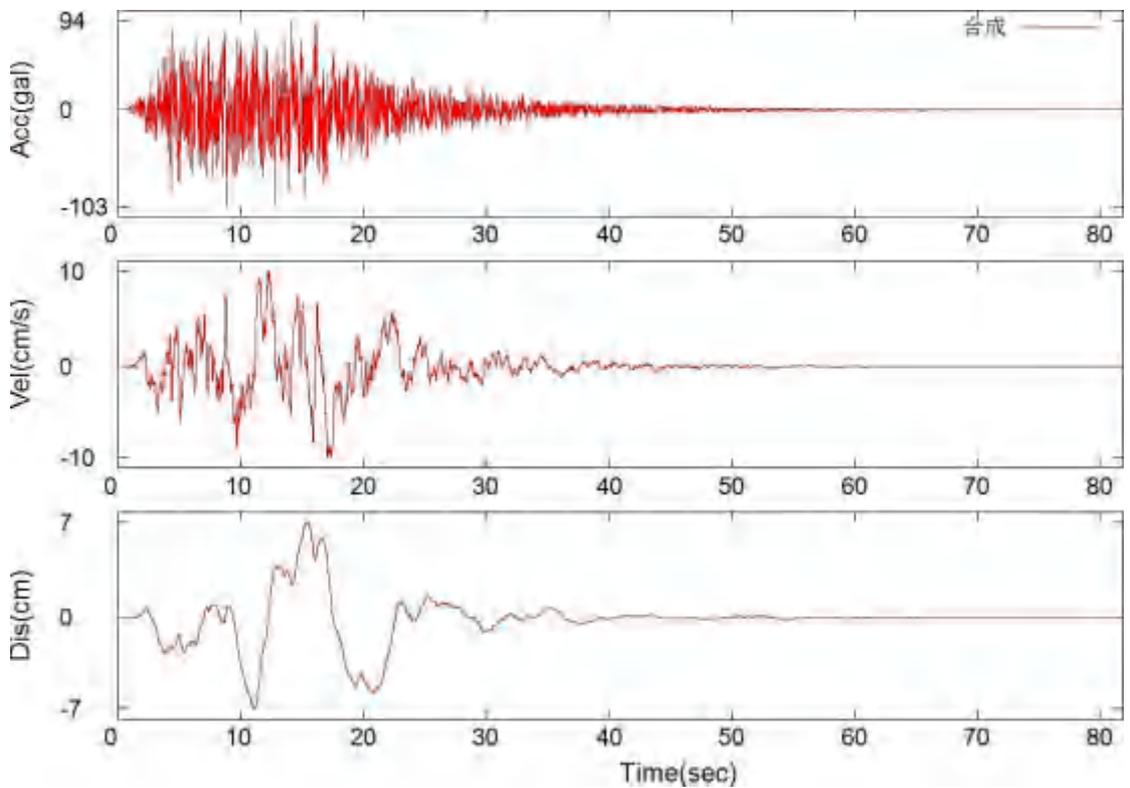
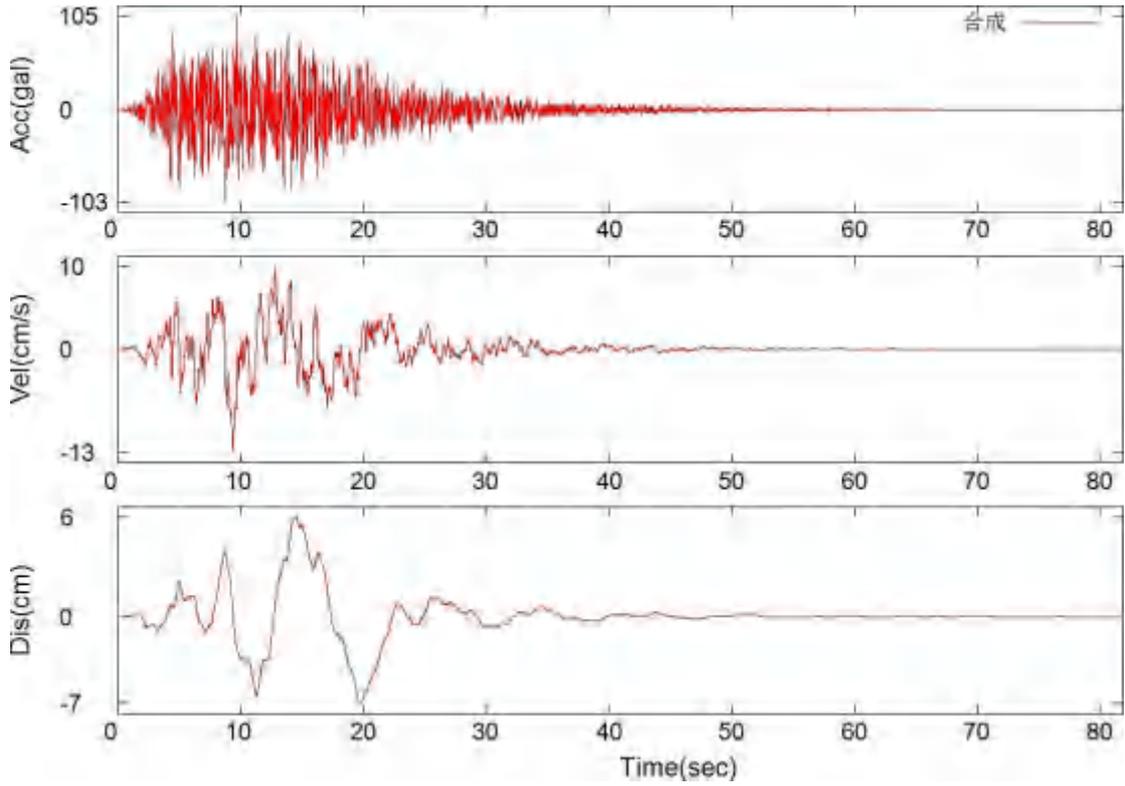
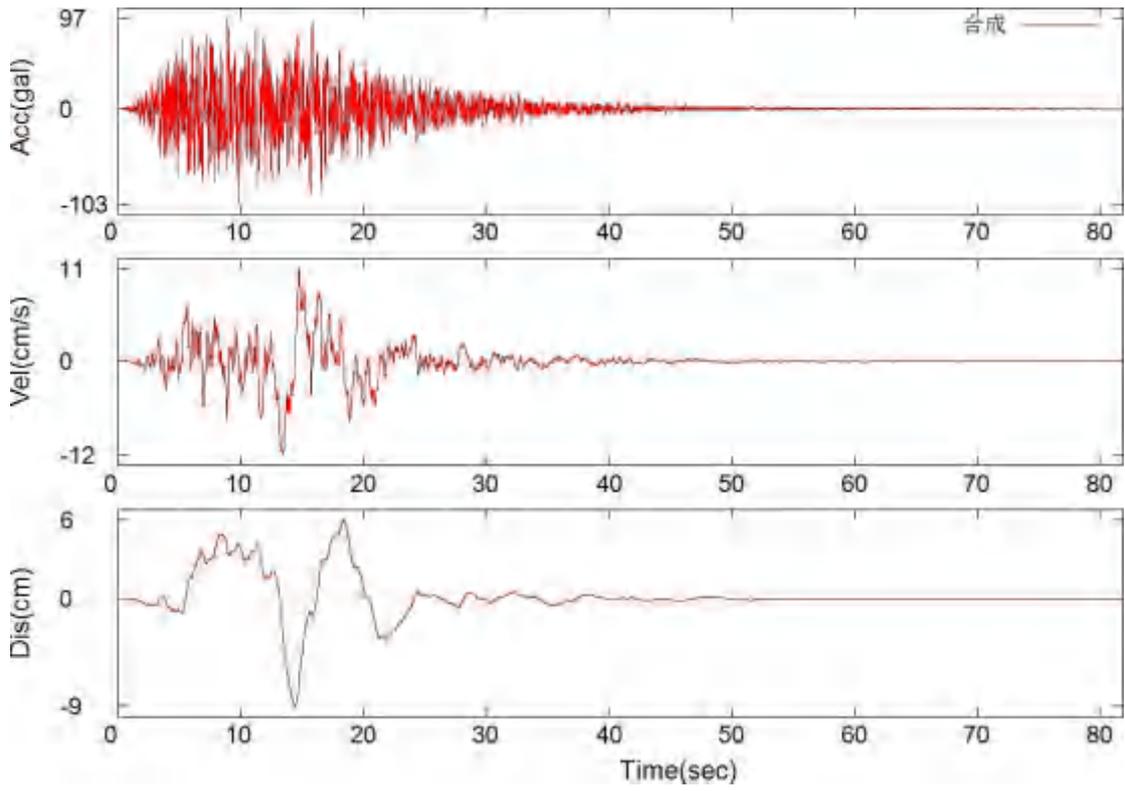
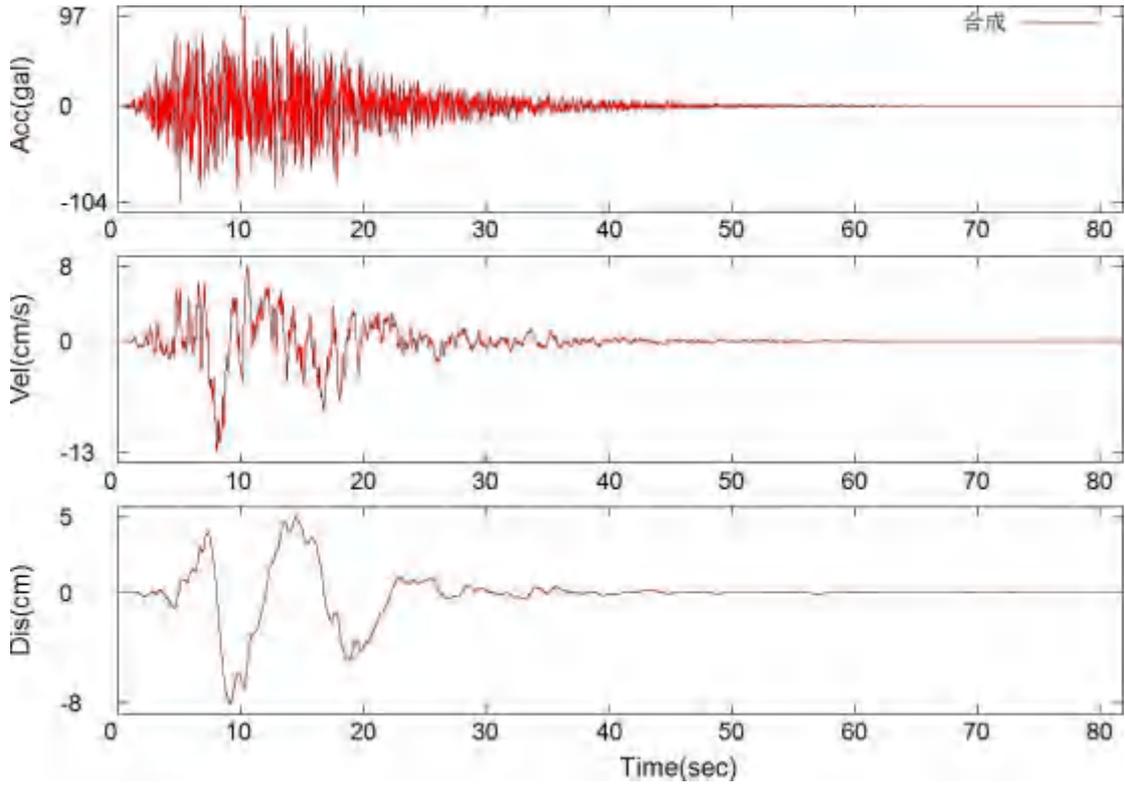
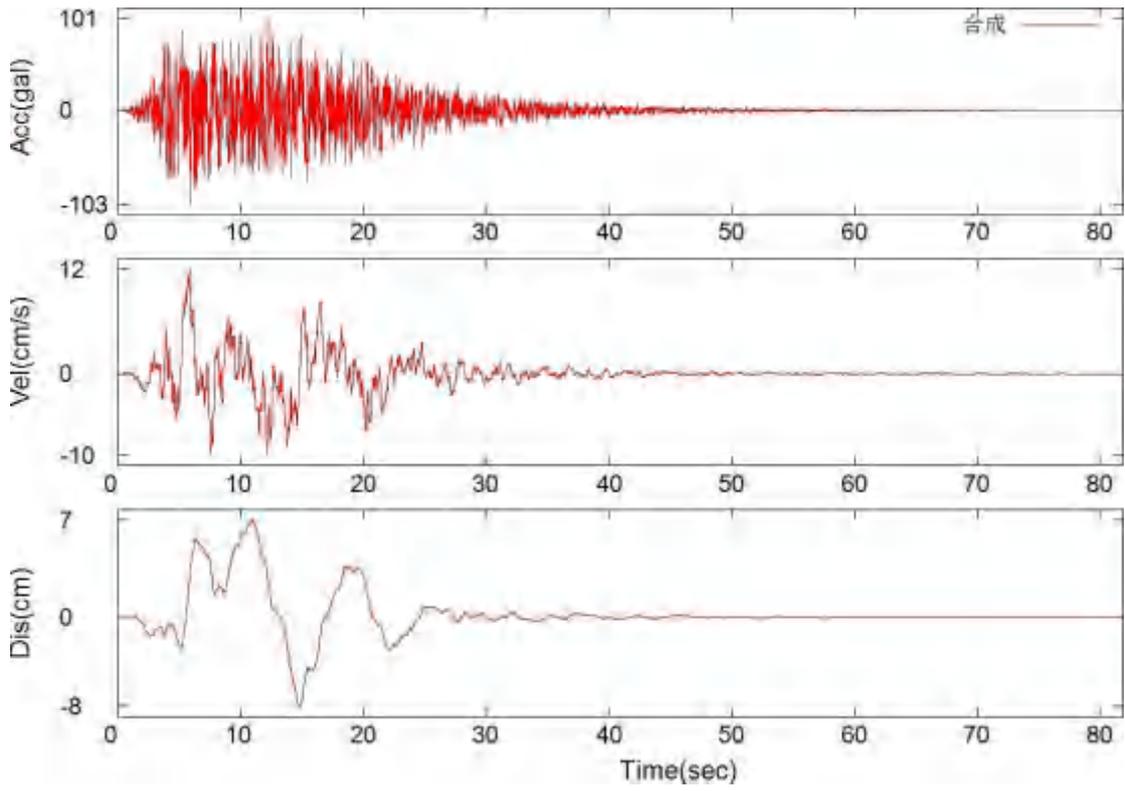
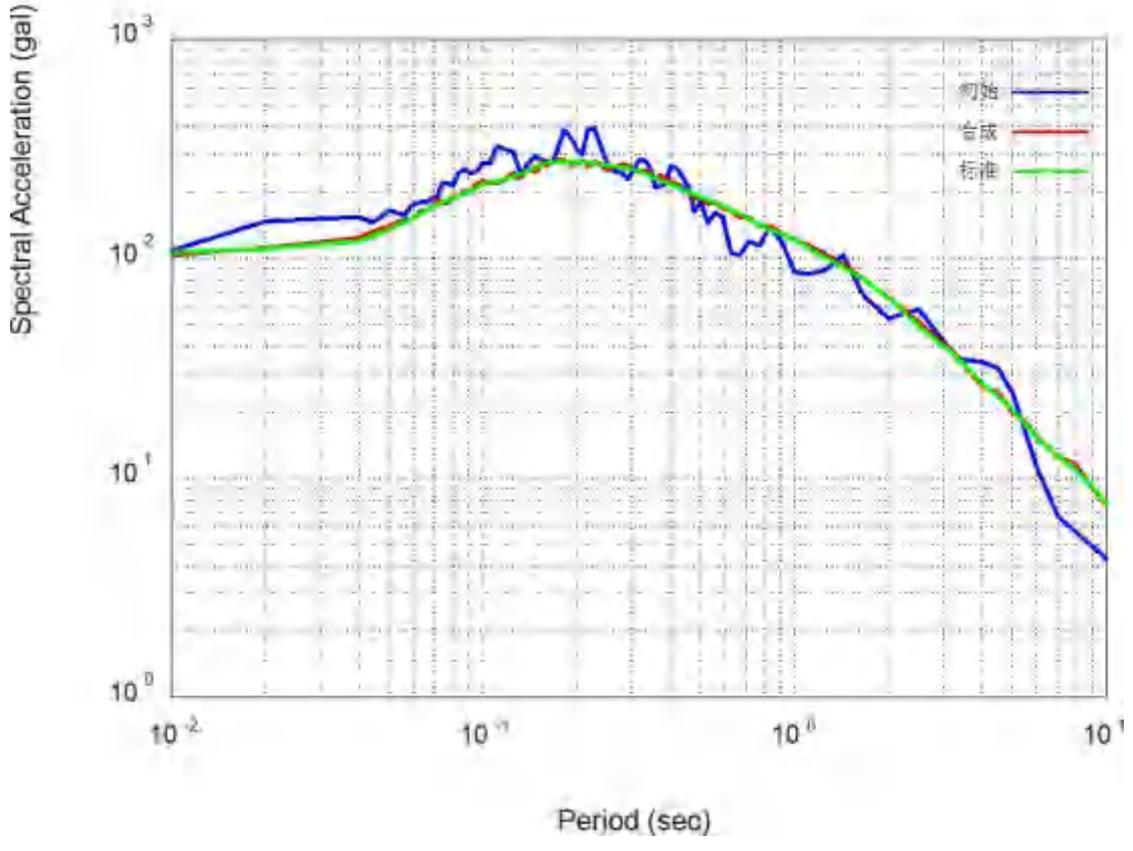
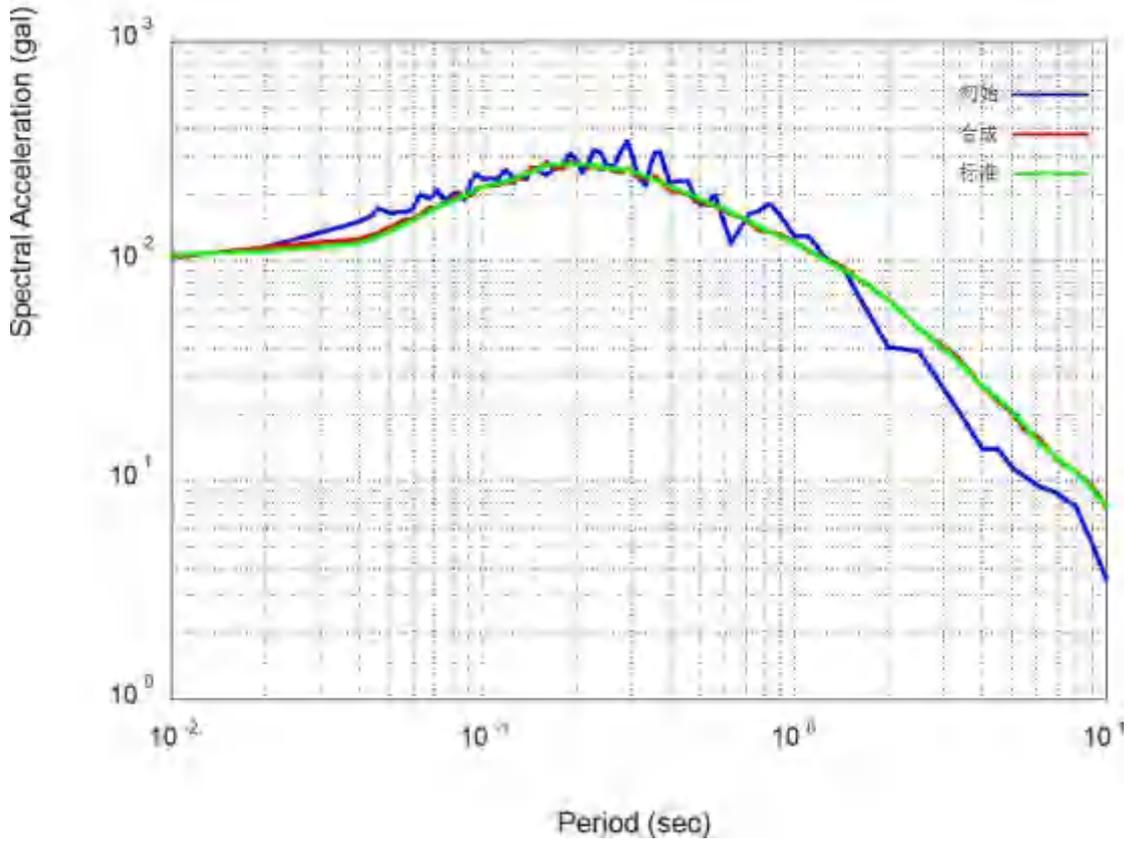


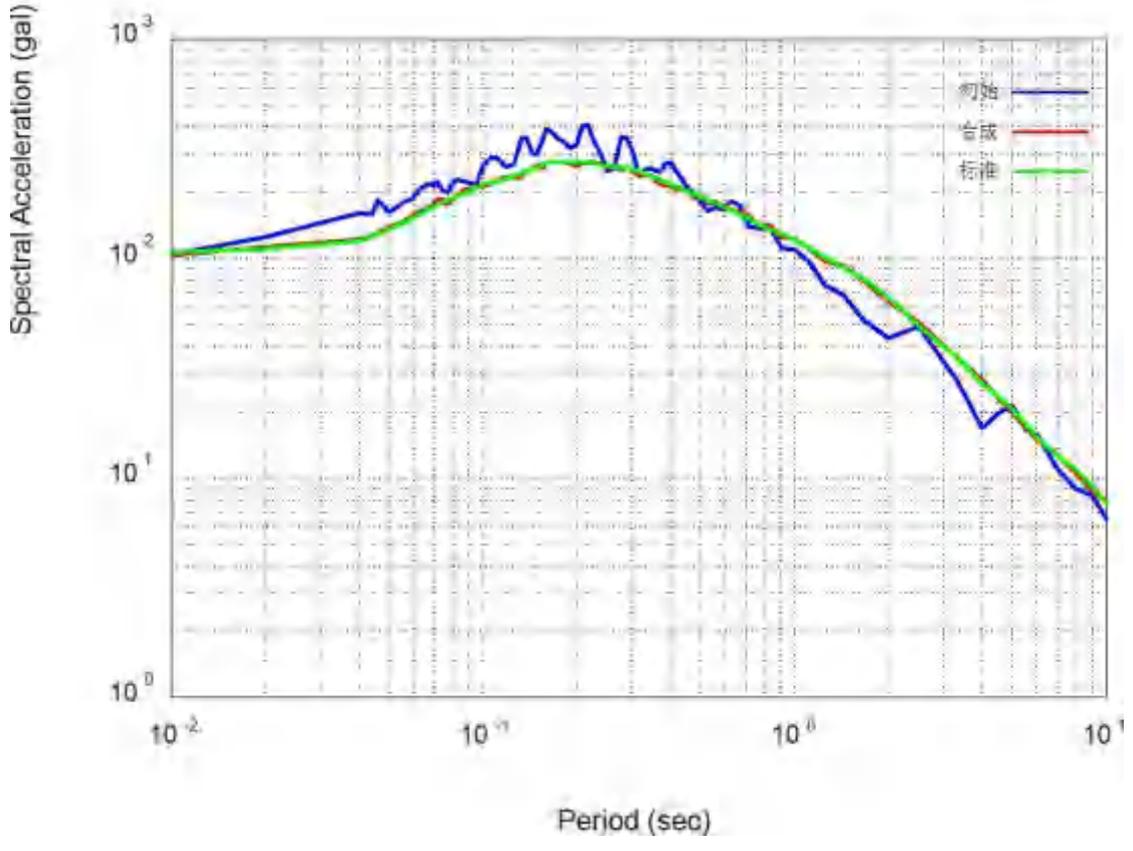
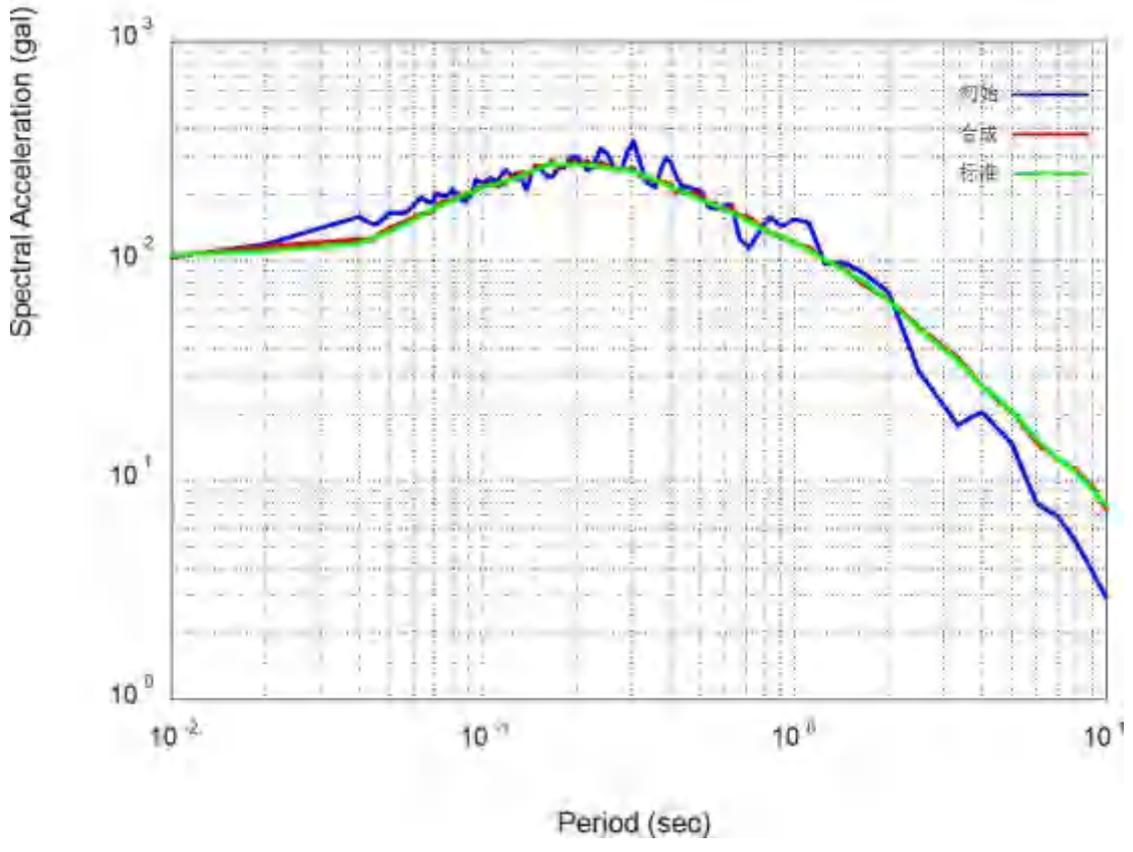
图 6.1.1B (zk64)基岩加速度、速度、位移及拟合反应谱曲线与目标谱的对比图(50 年超越概率 10%)











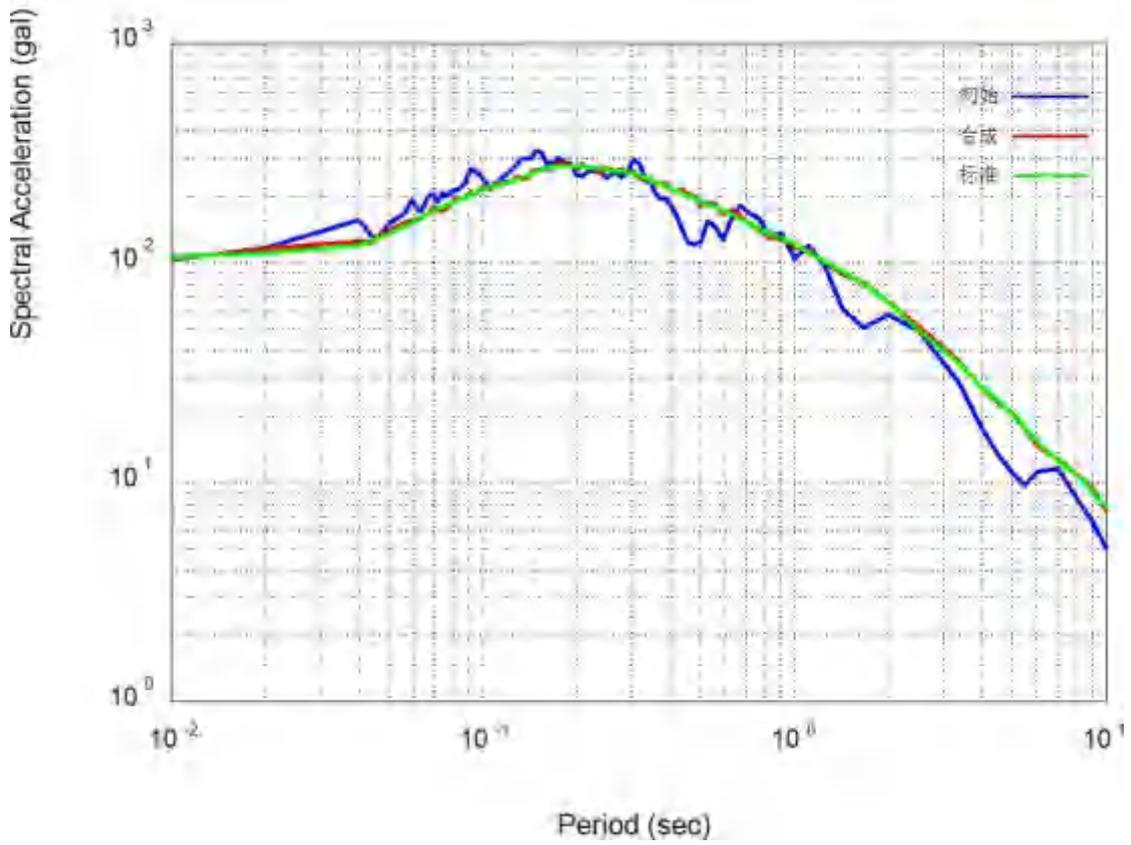
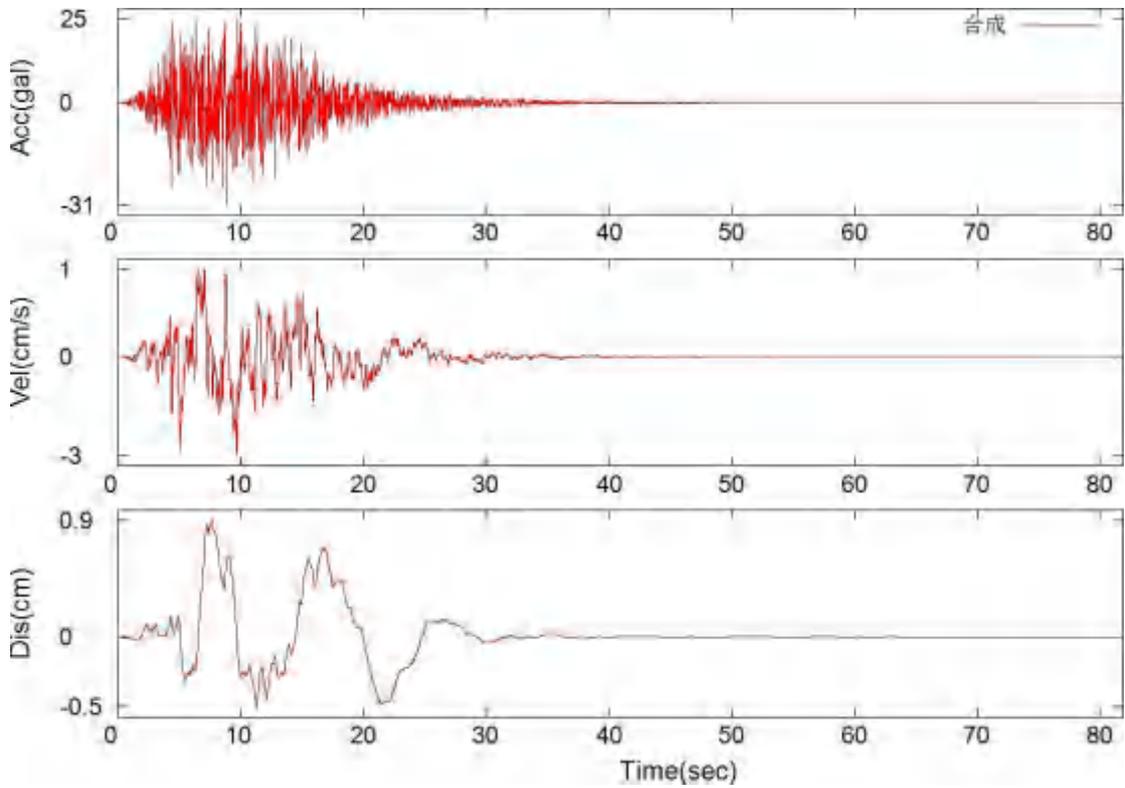
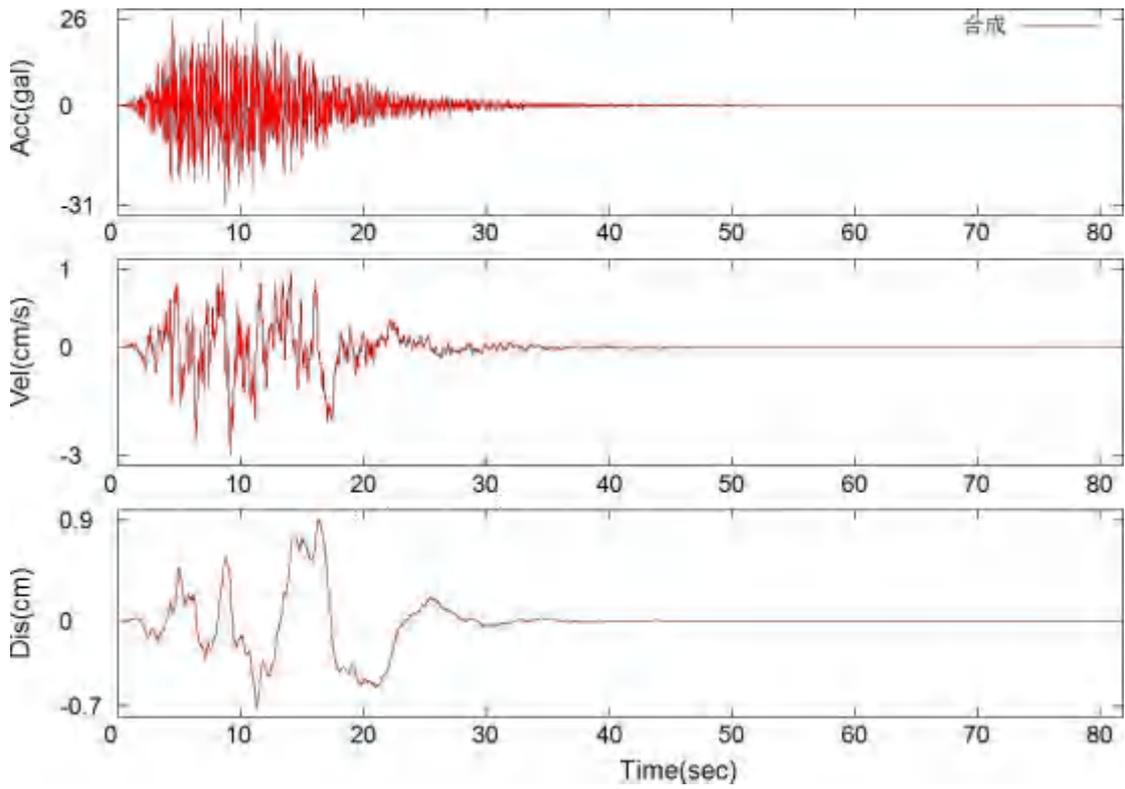
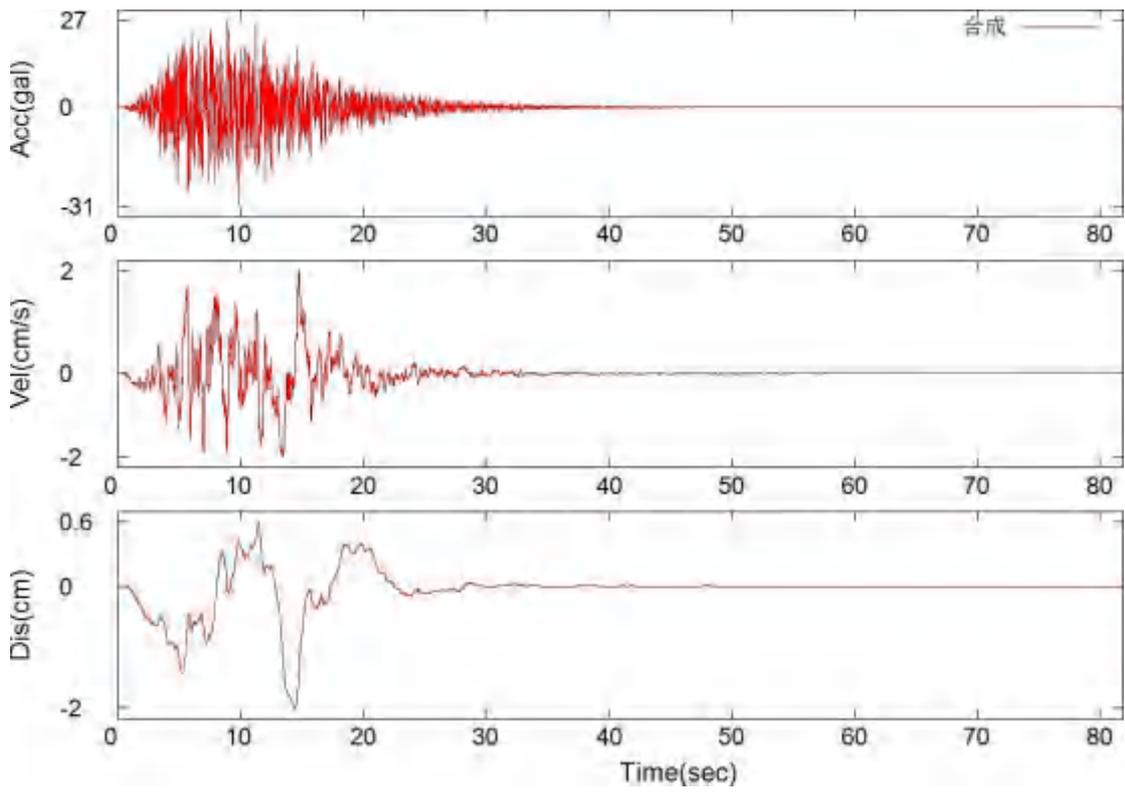
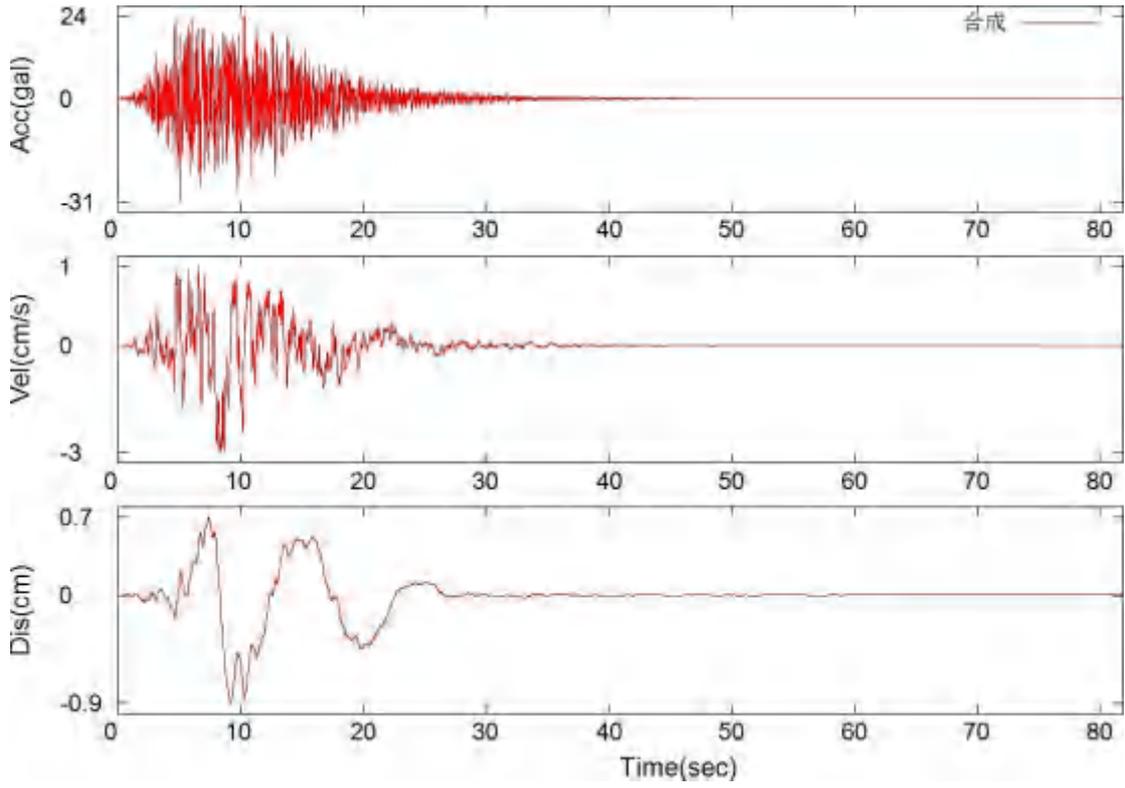
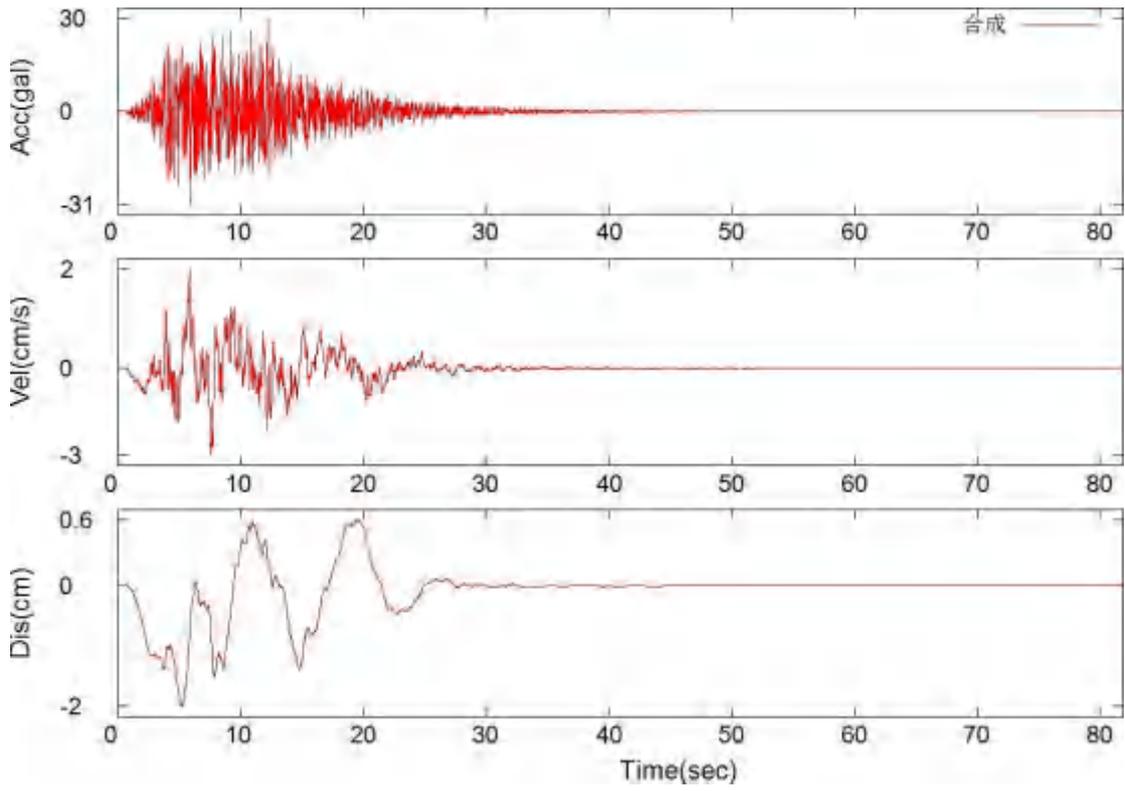
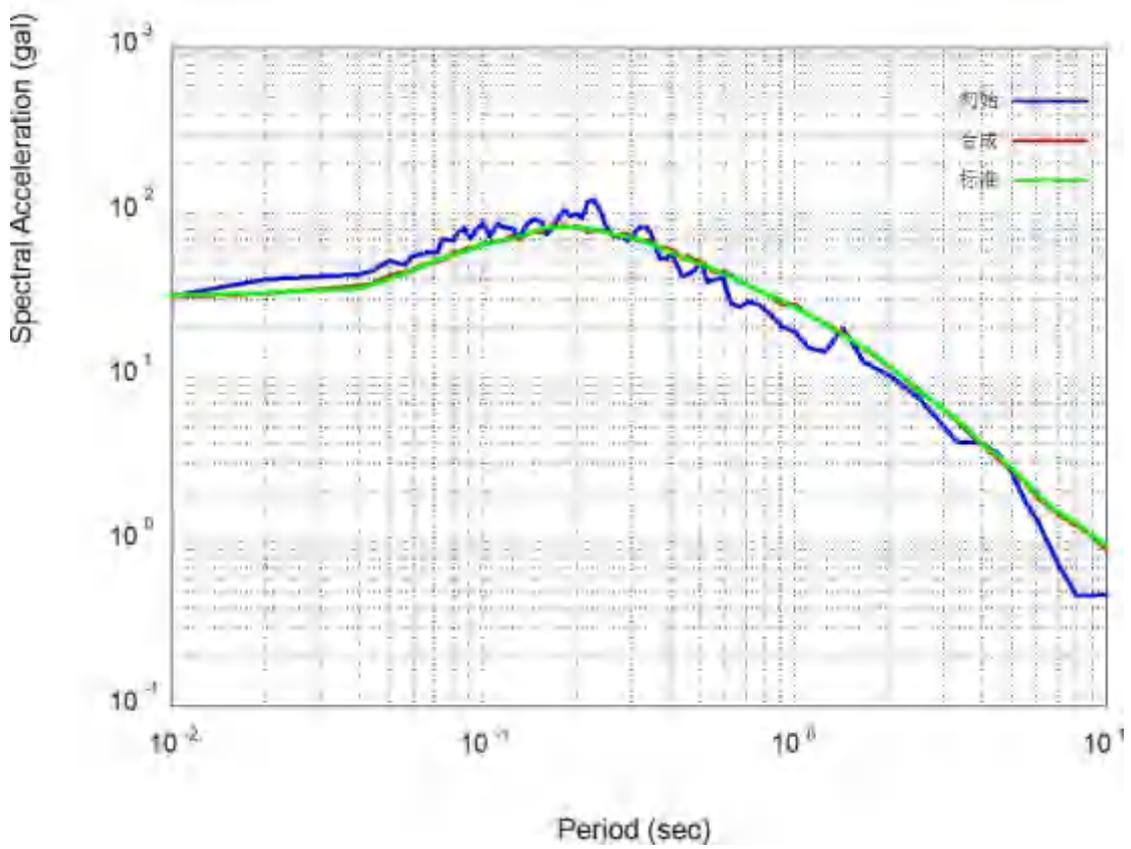
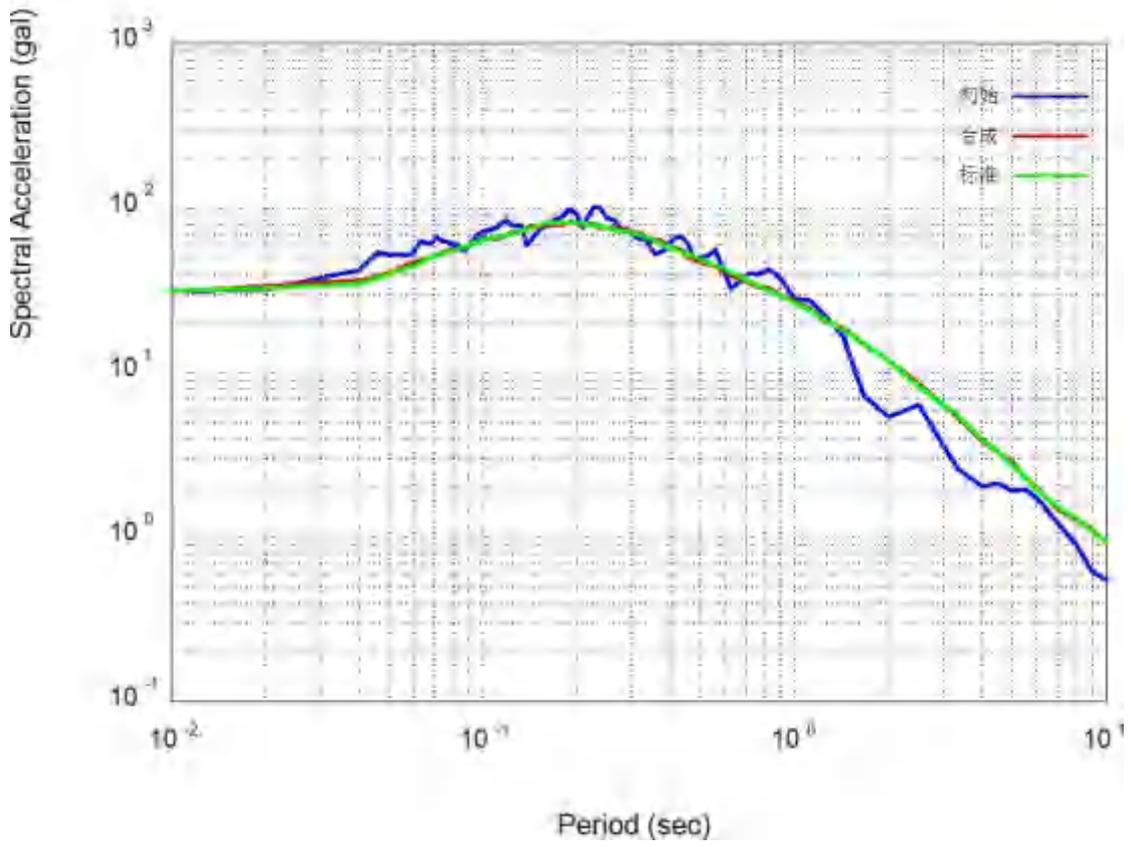


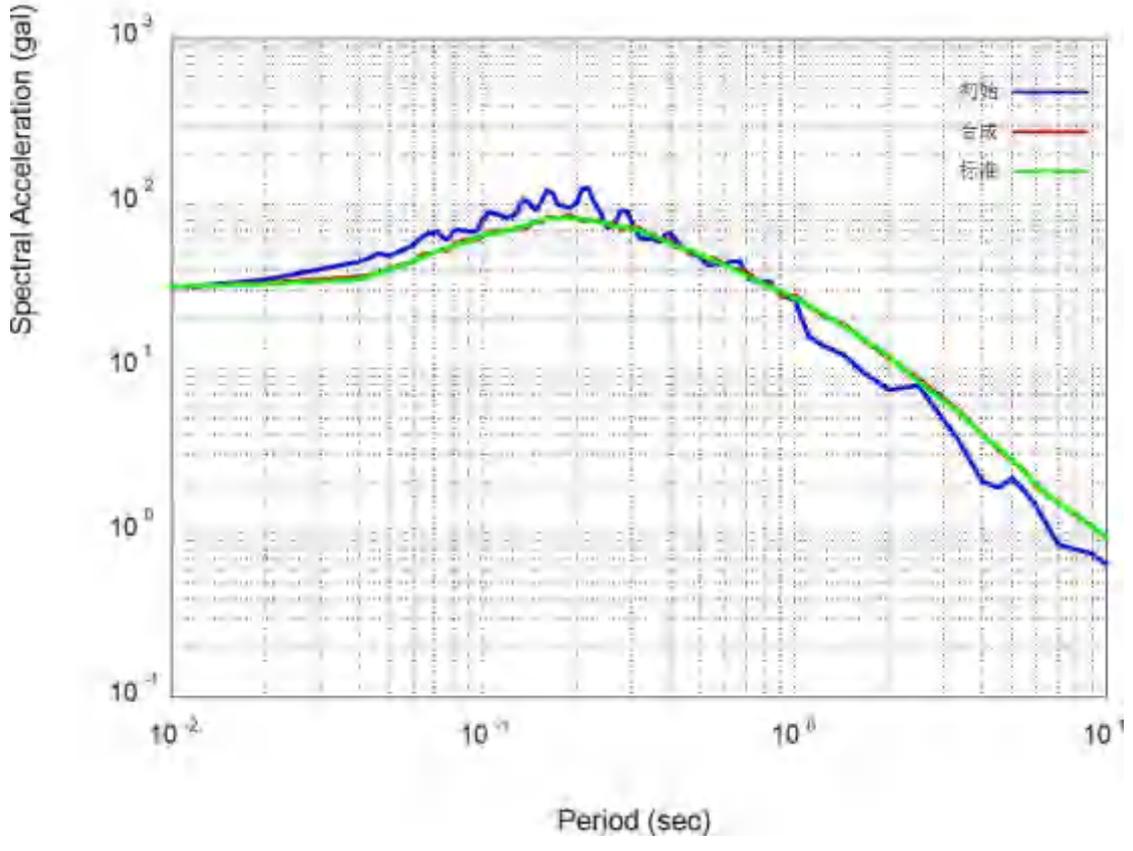
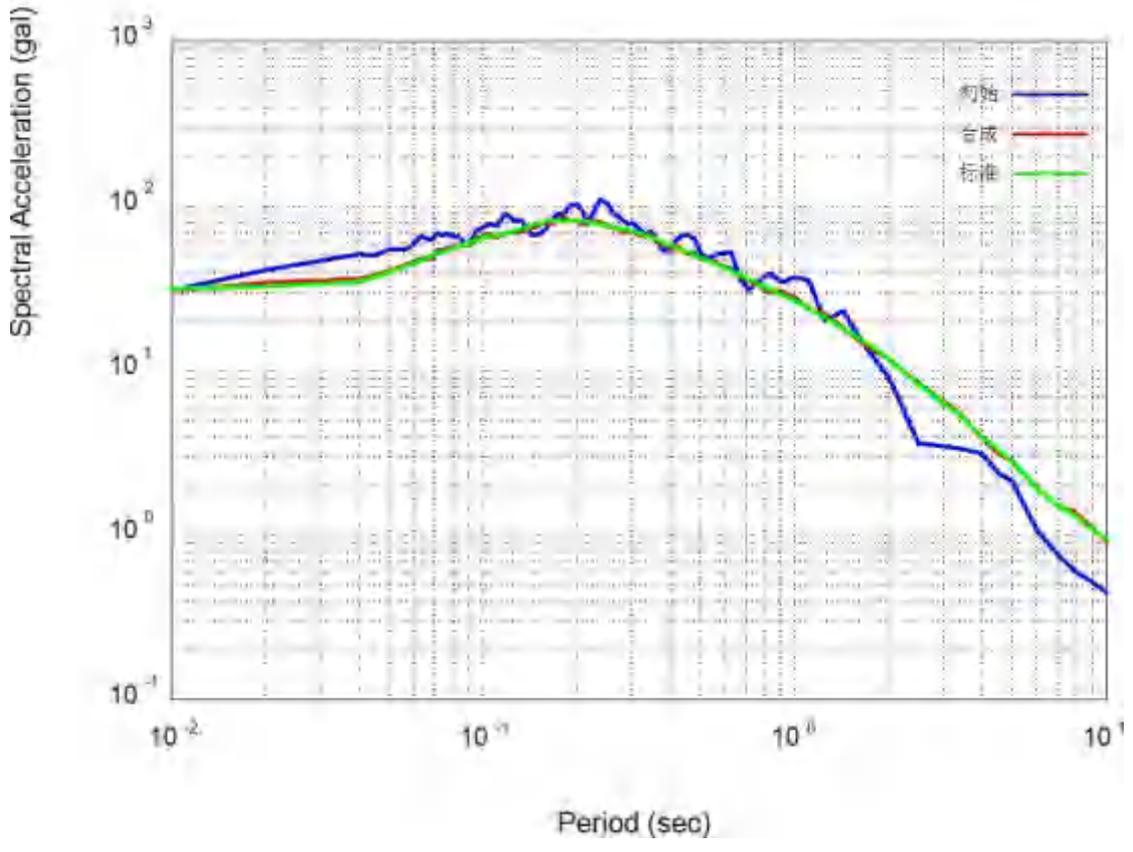
图 6.1.1C (zk64)基岩加速度、速度、位移时程及拟合反应谱曲线与目标谱的对比图(50 年超越概率 2%)











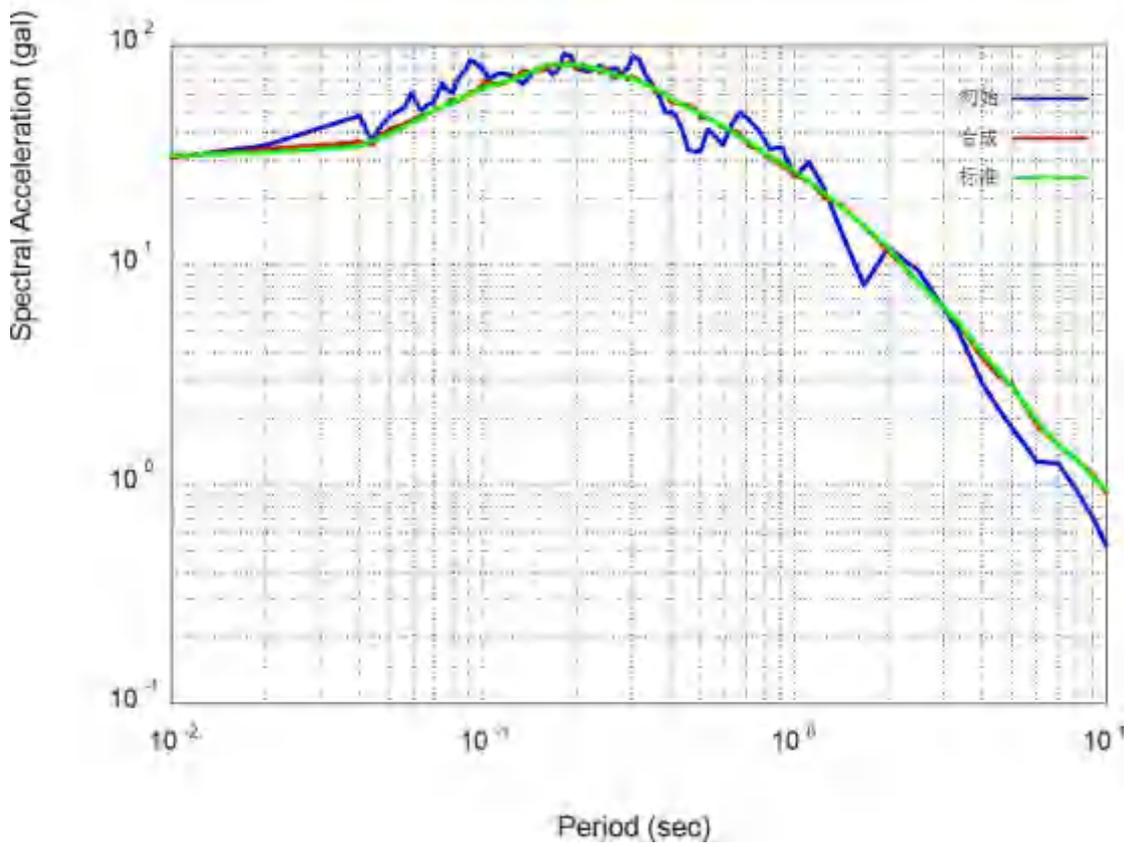
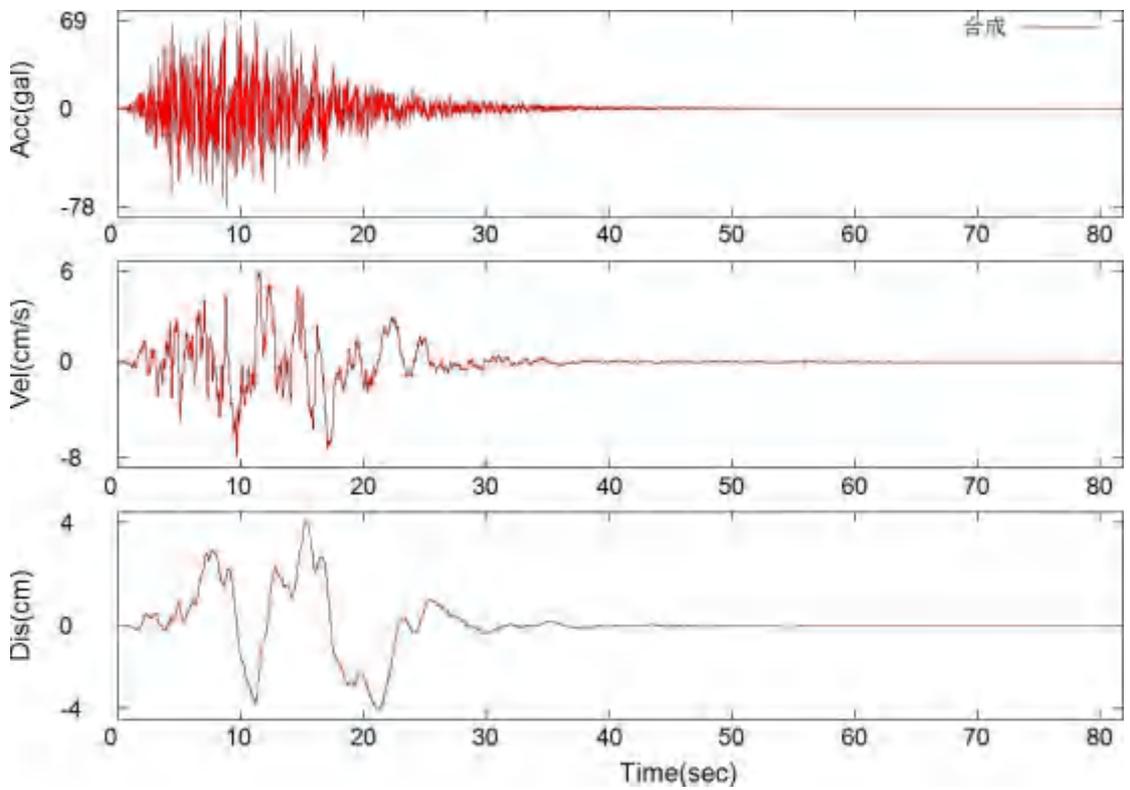
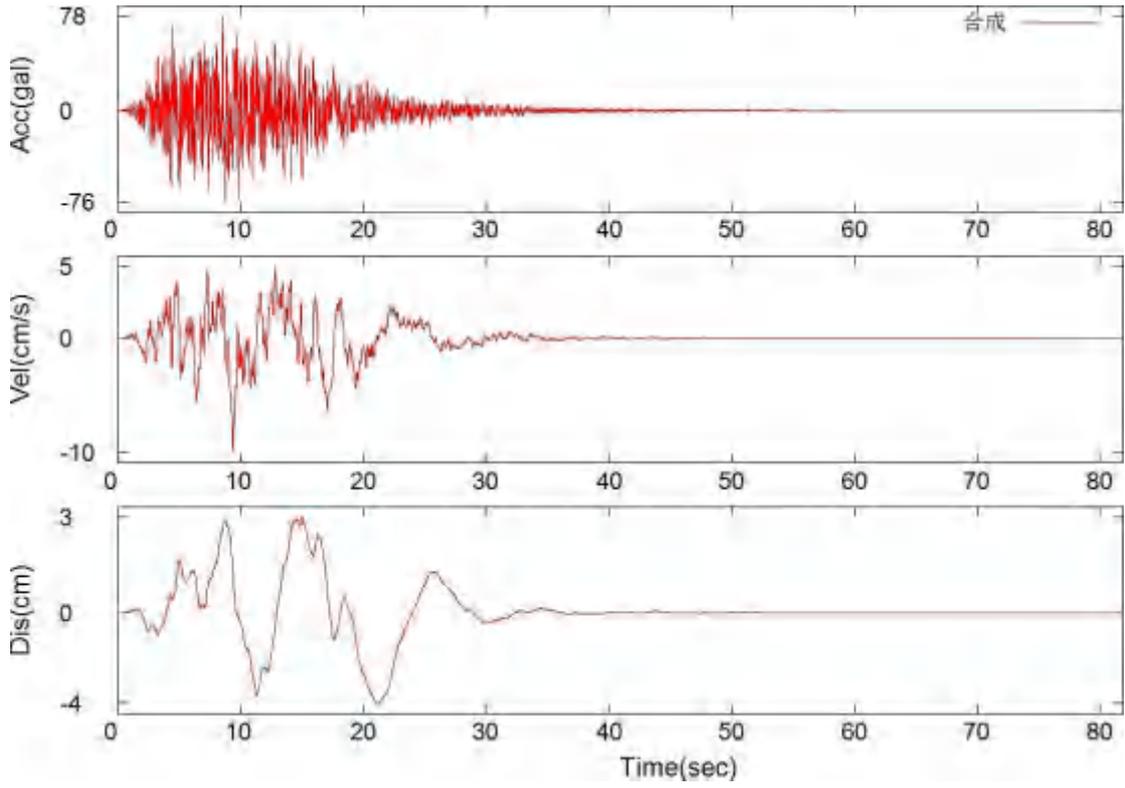
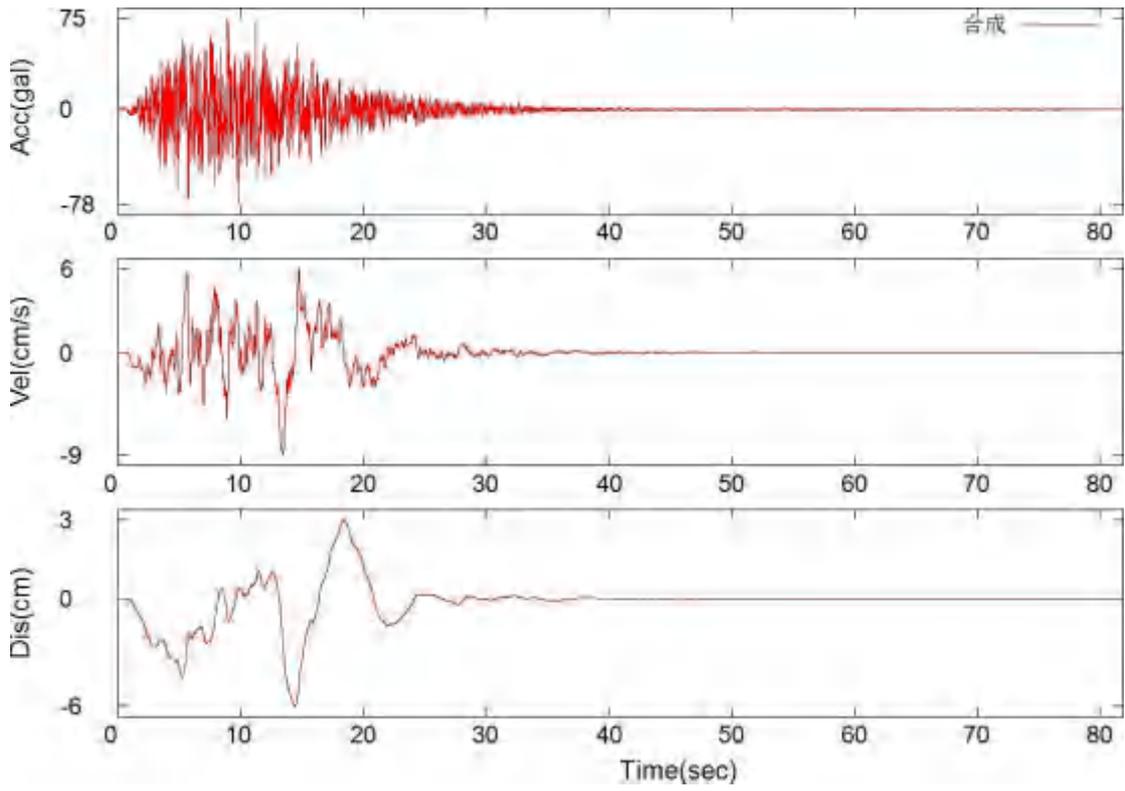
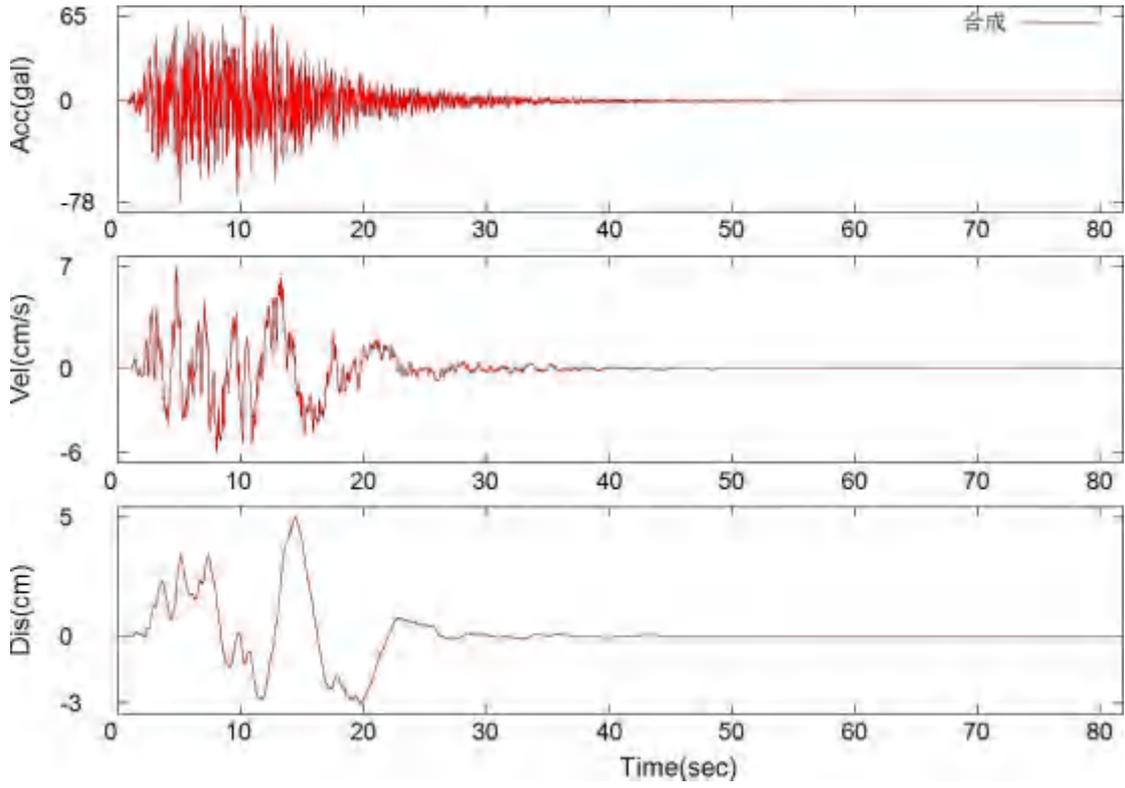
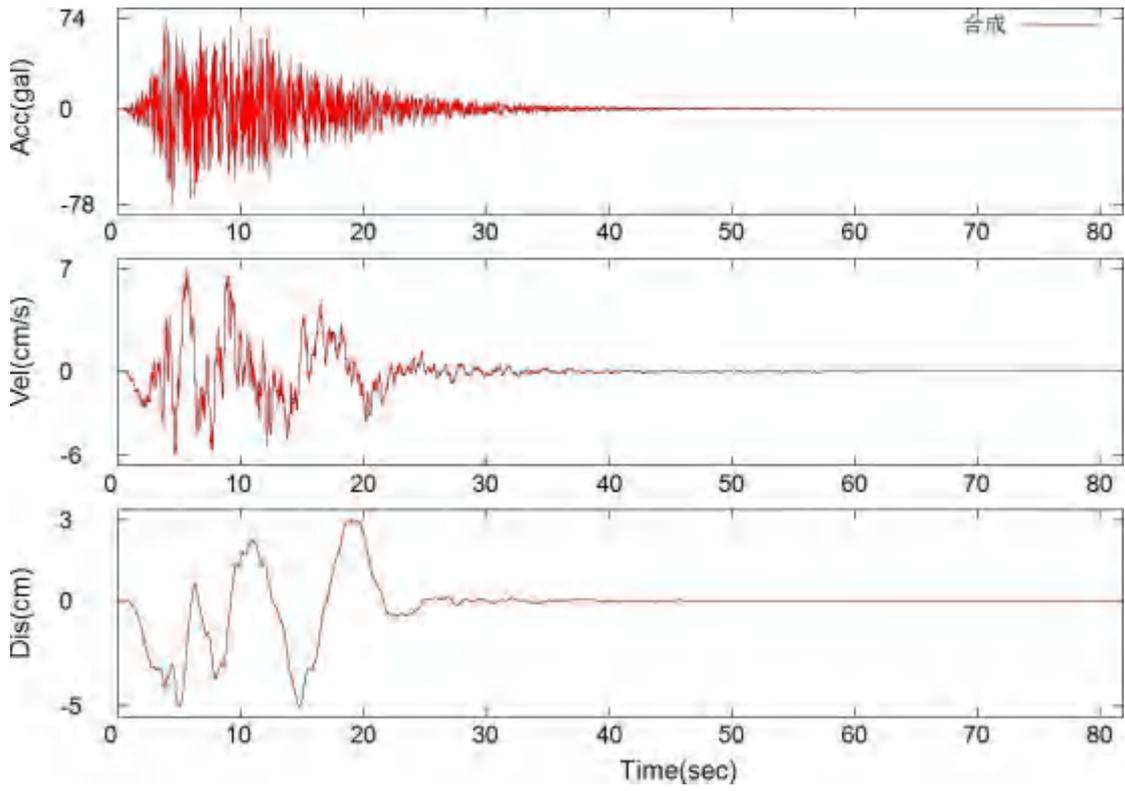
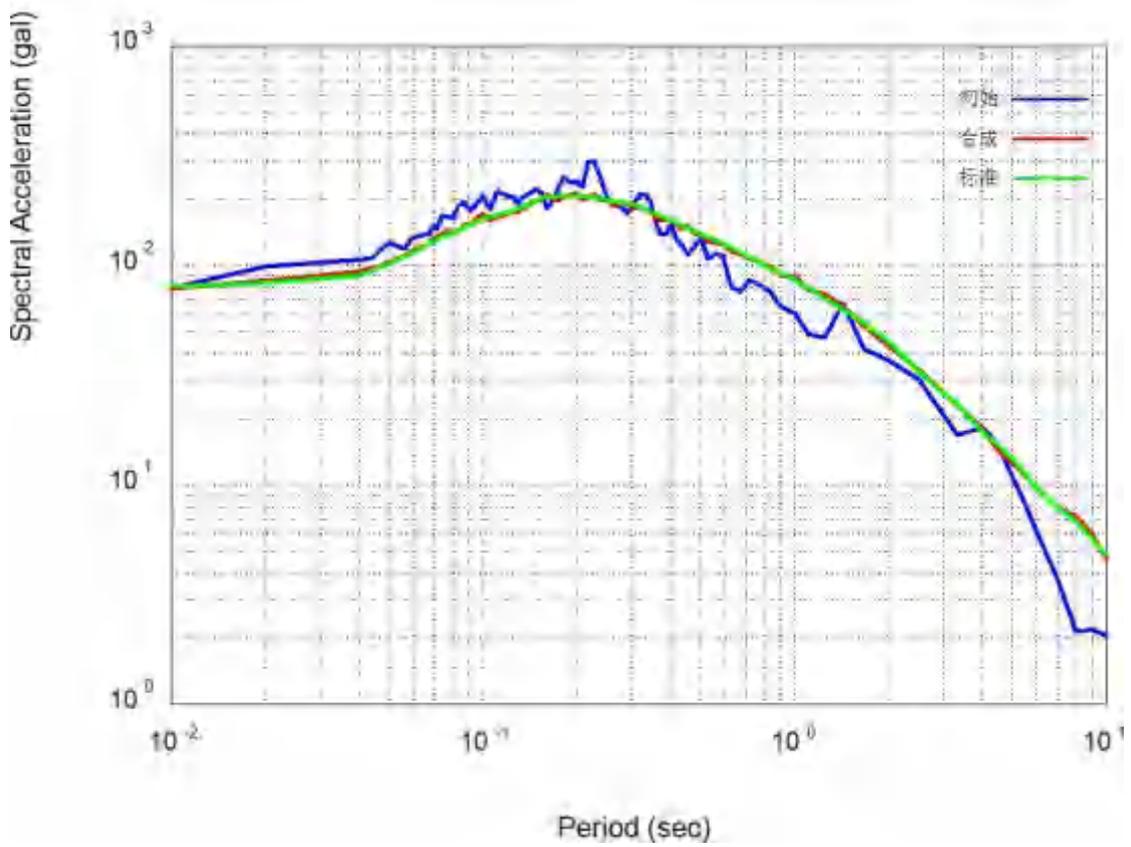
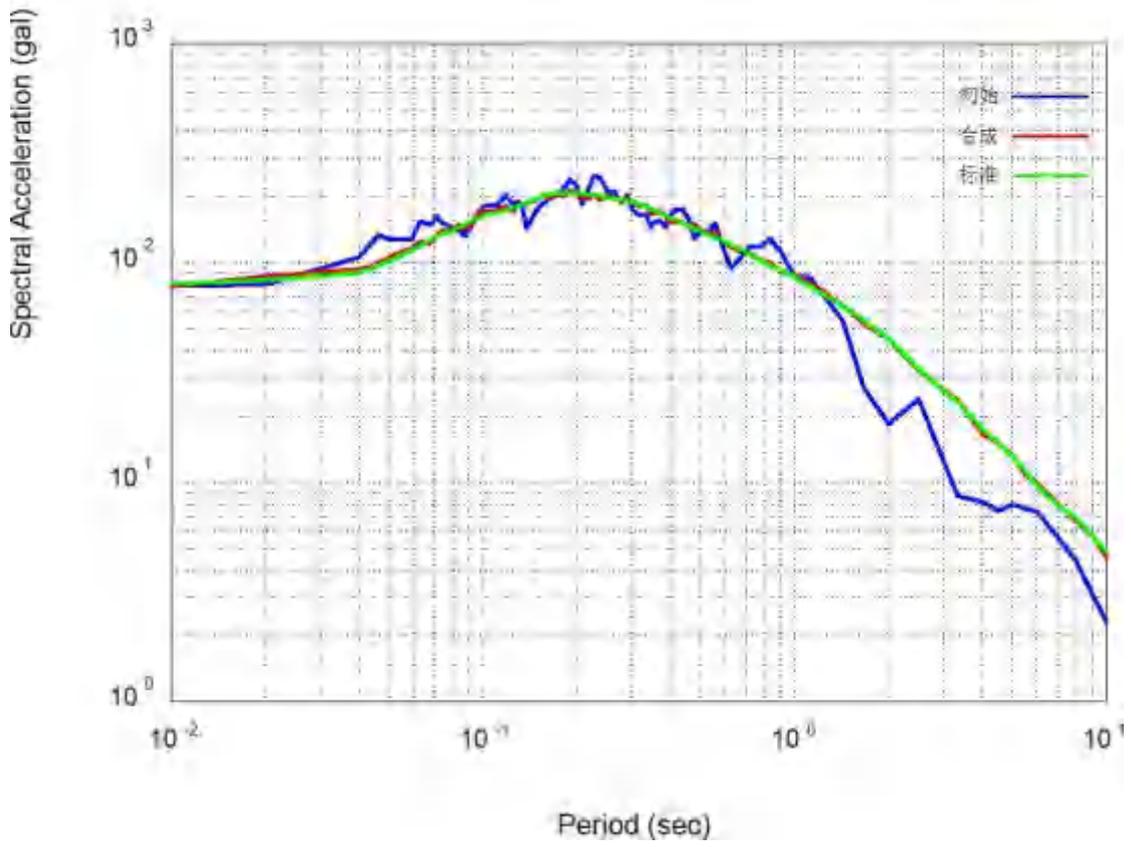


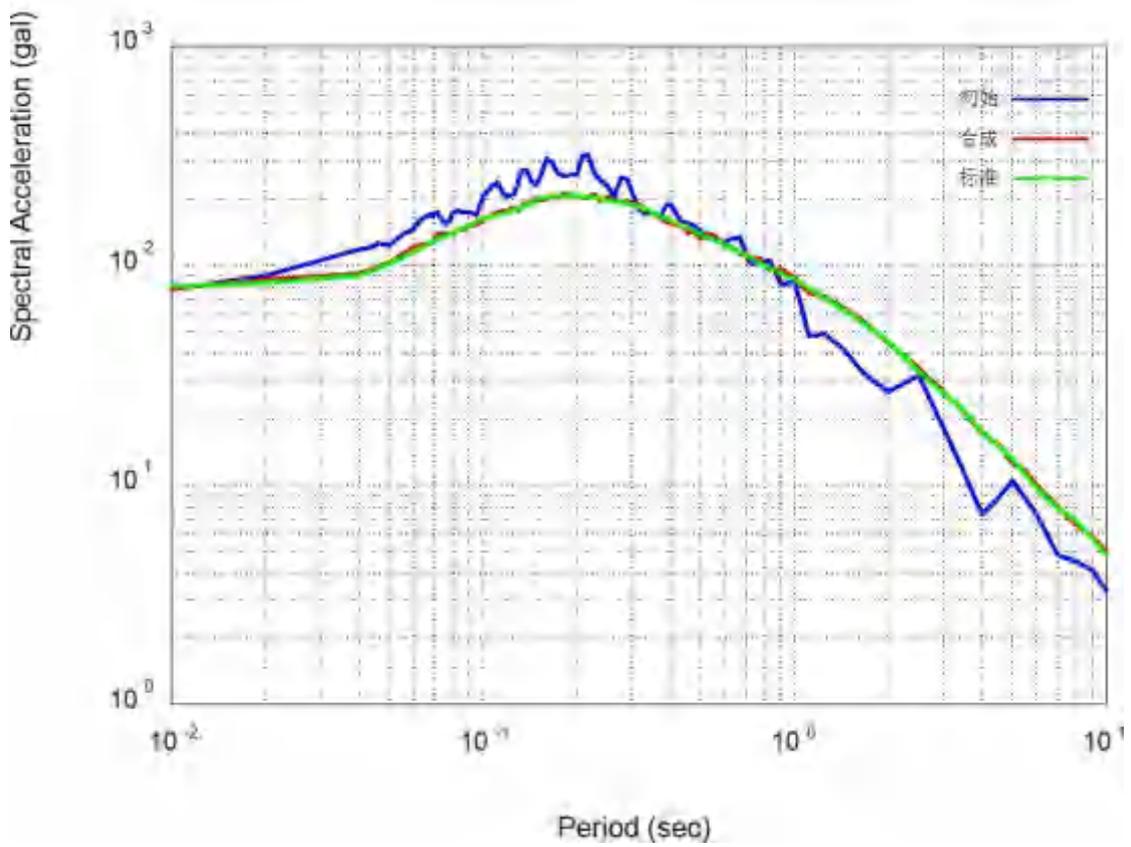
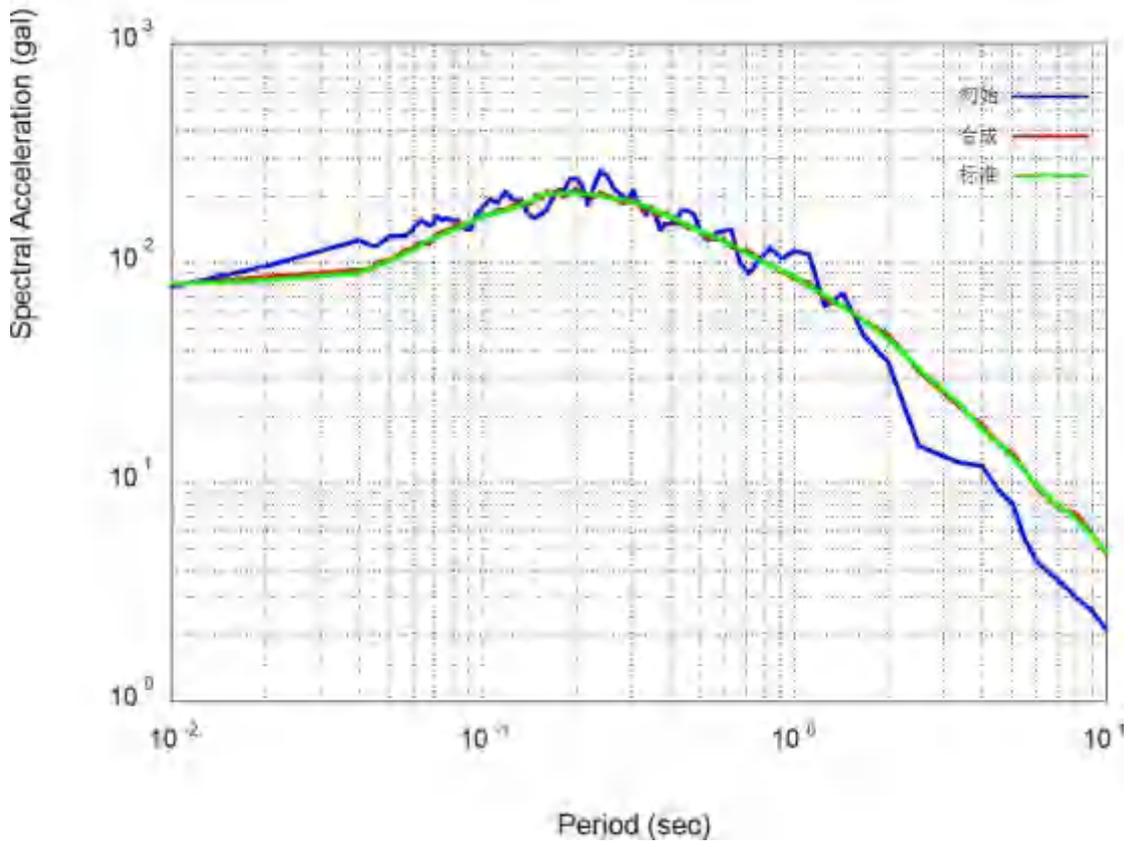
图 6.1.1D (zk64)基岩加速度、速度、位移时程及拟合反应谱曲线与目标谱的对比图(100年超越概率 63%)











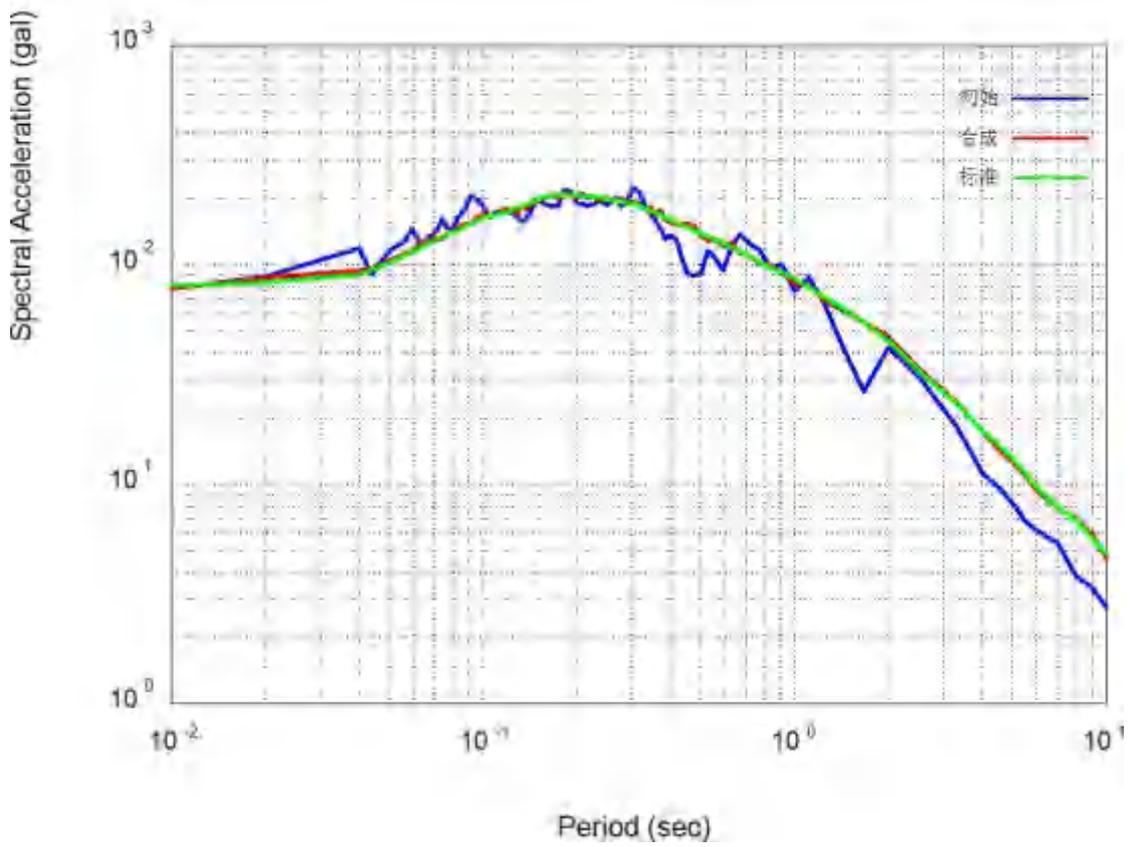
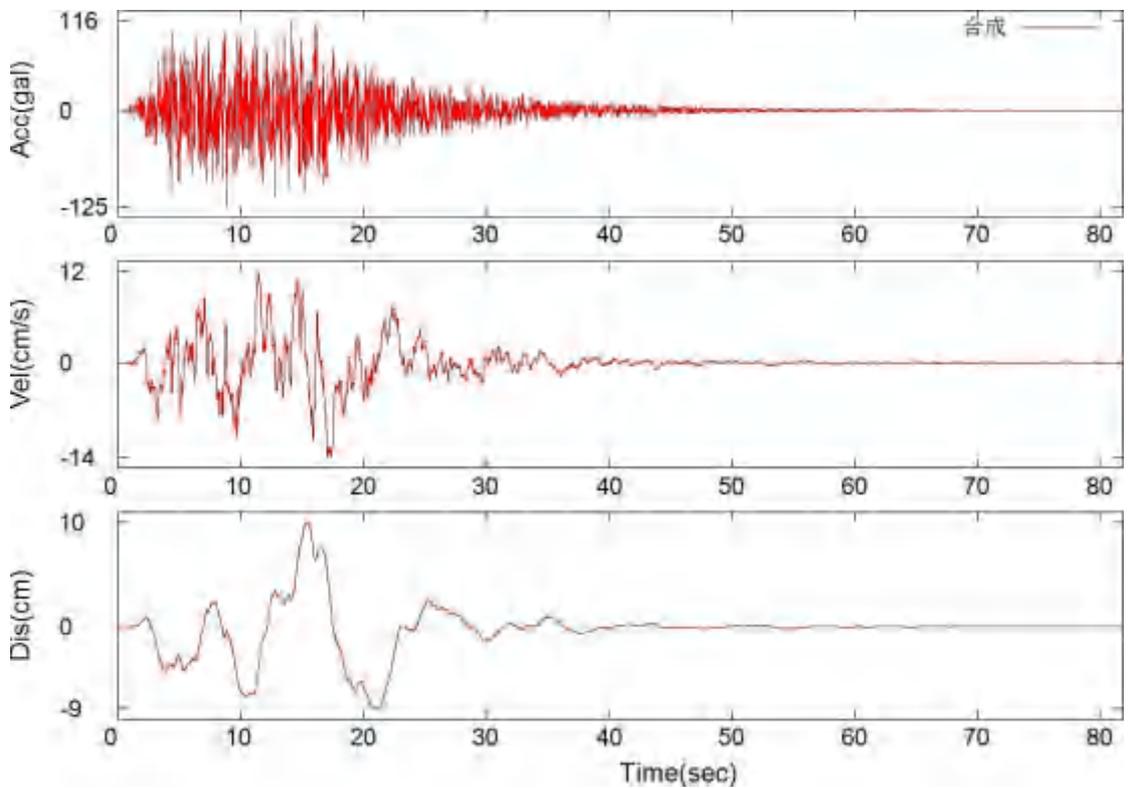
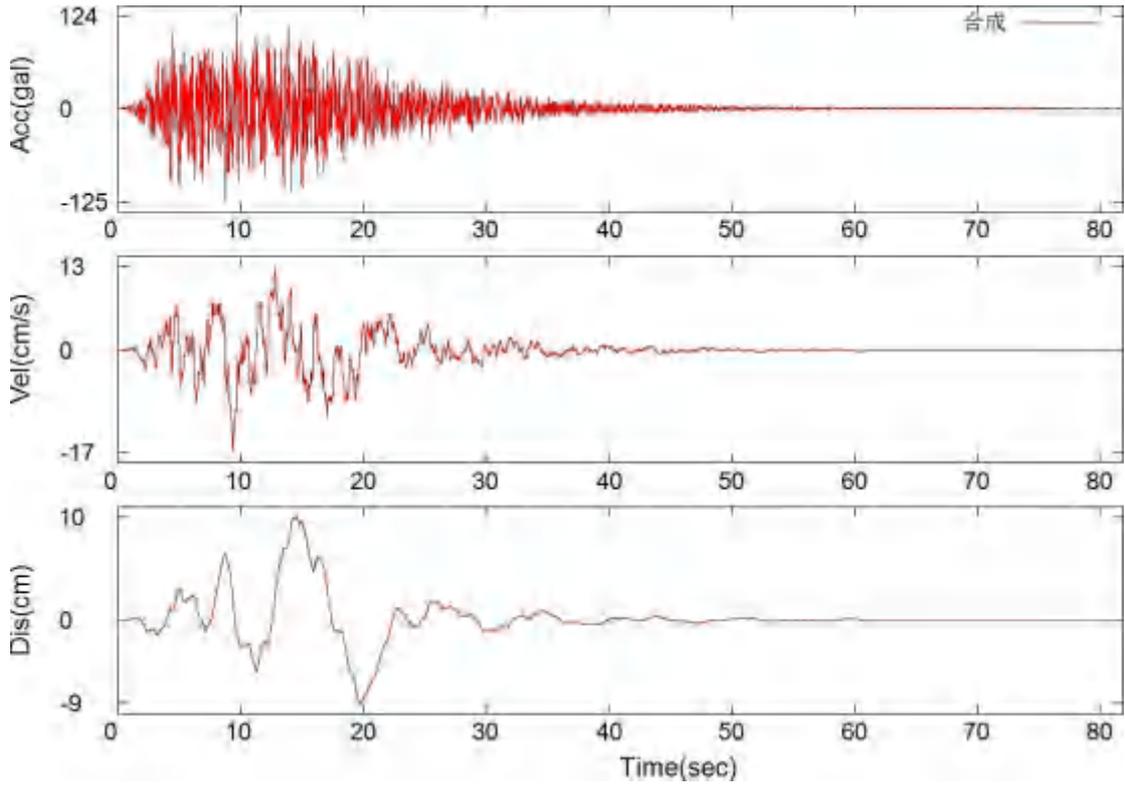
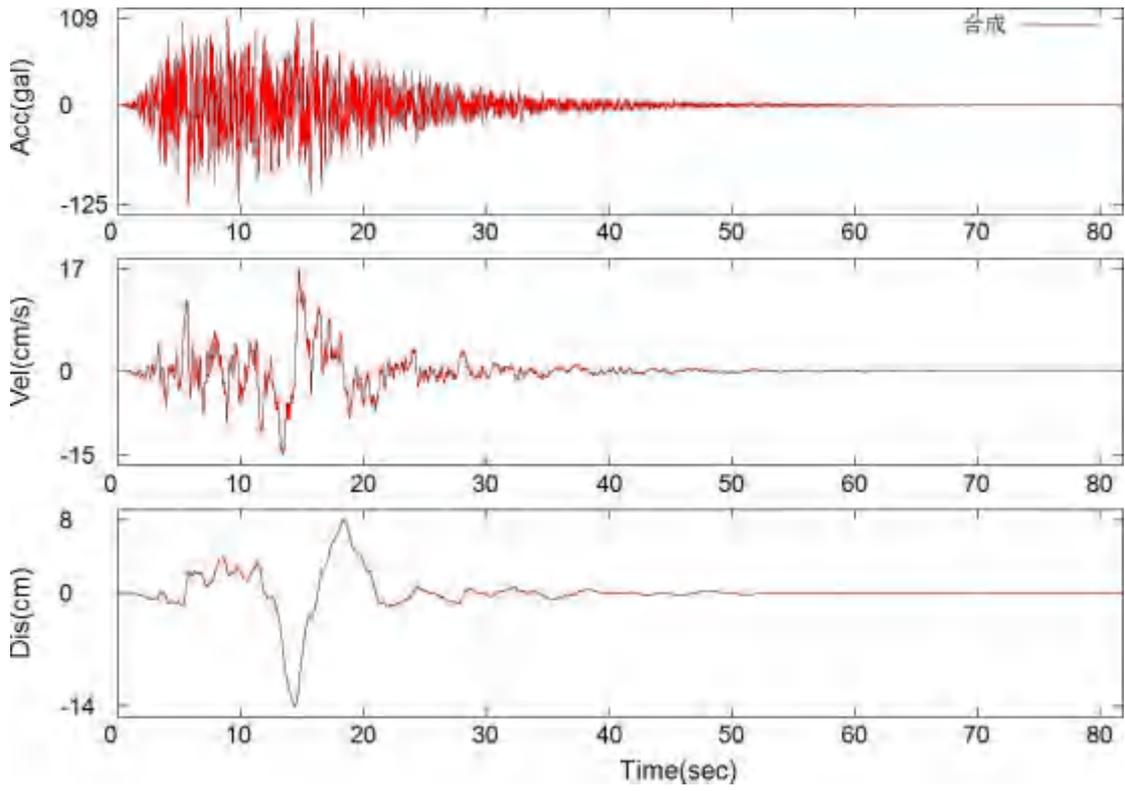
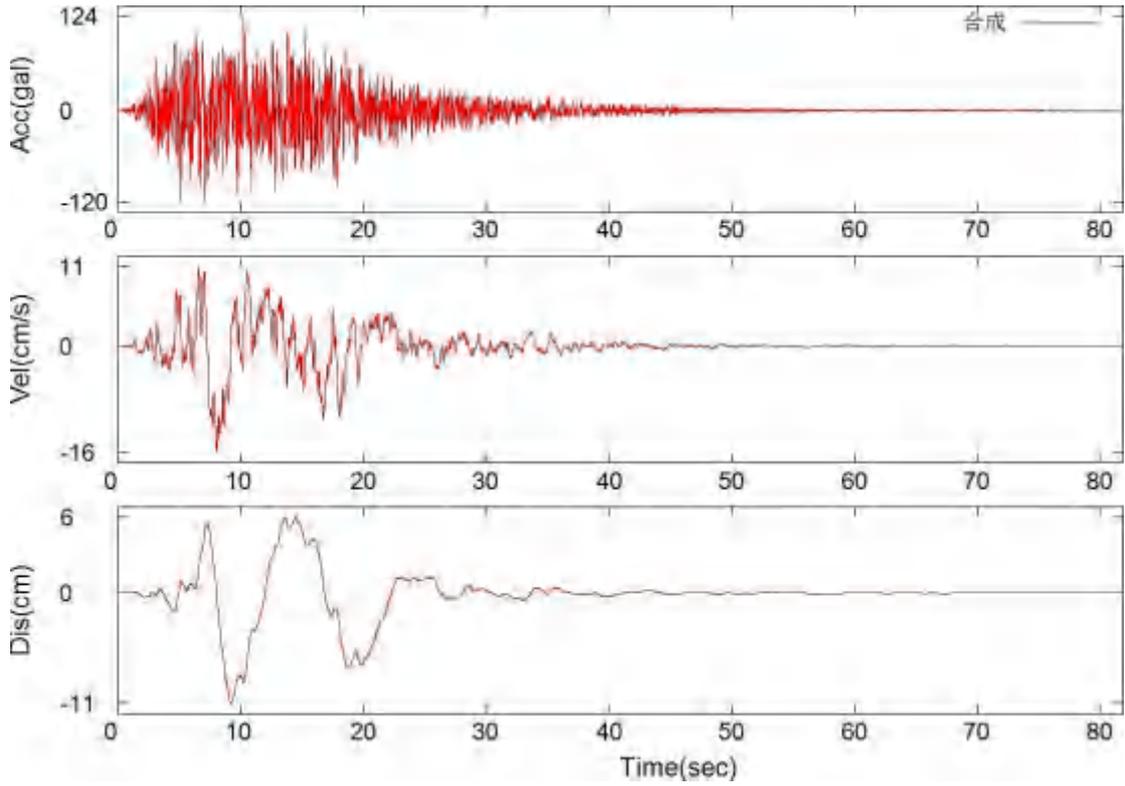
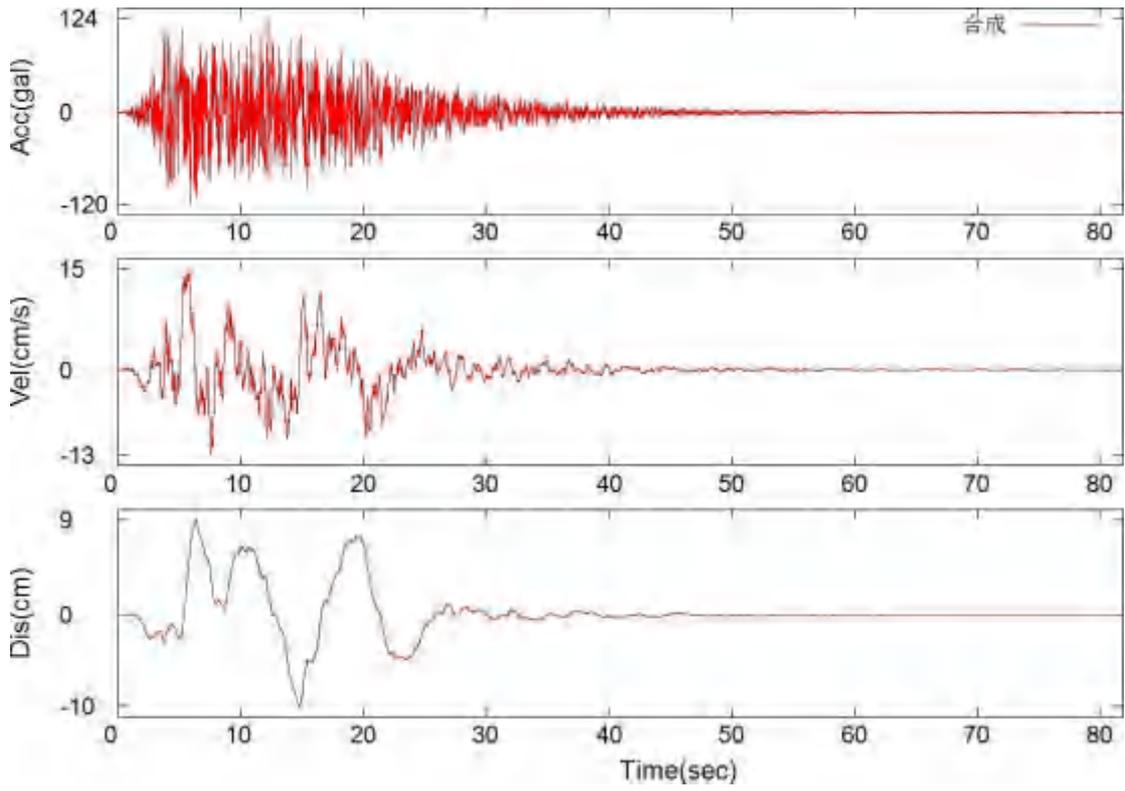
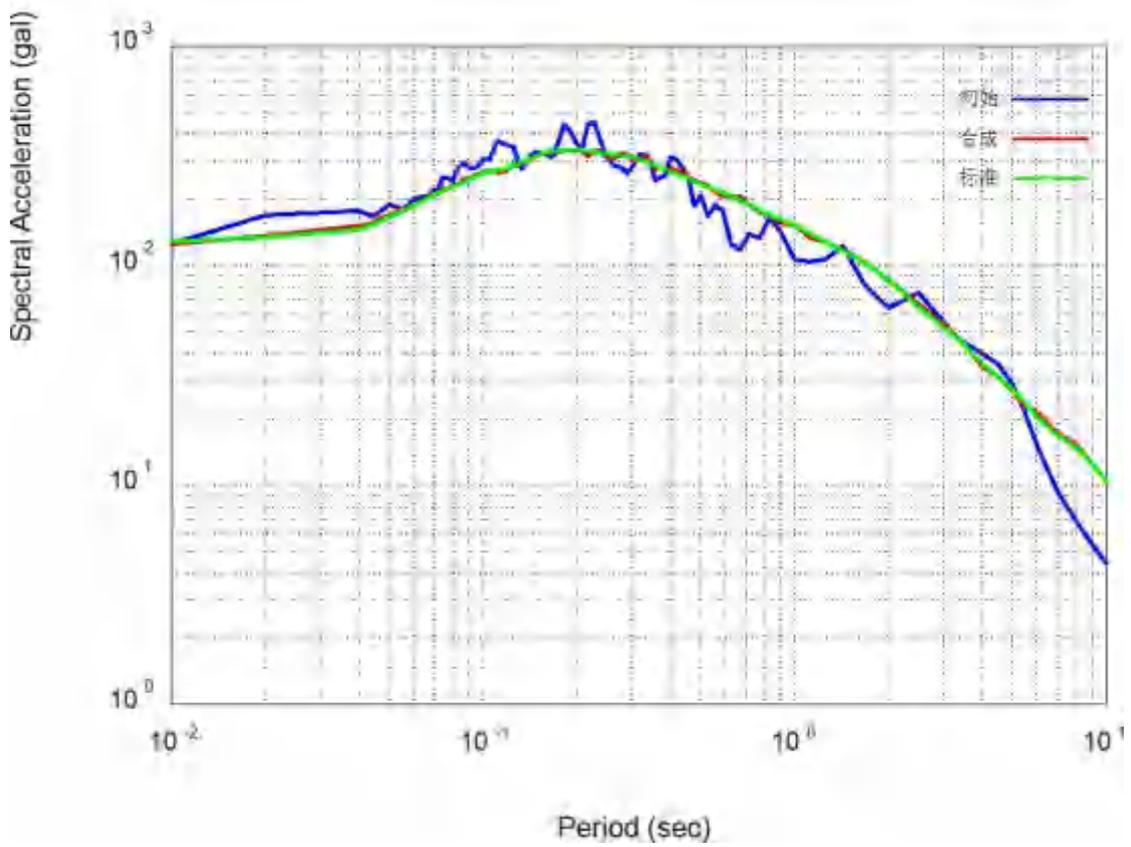
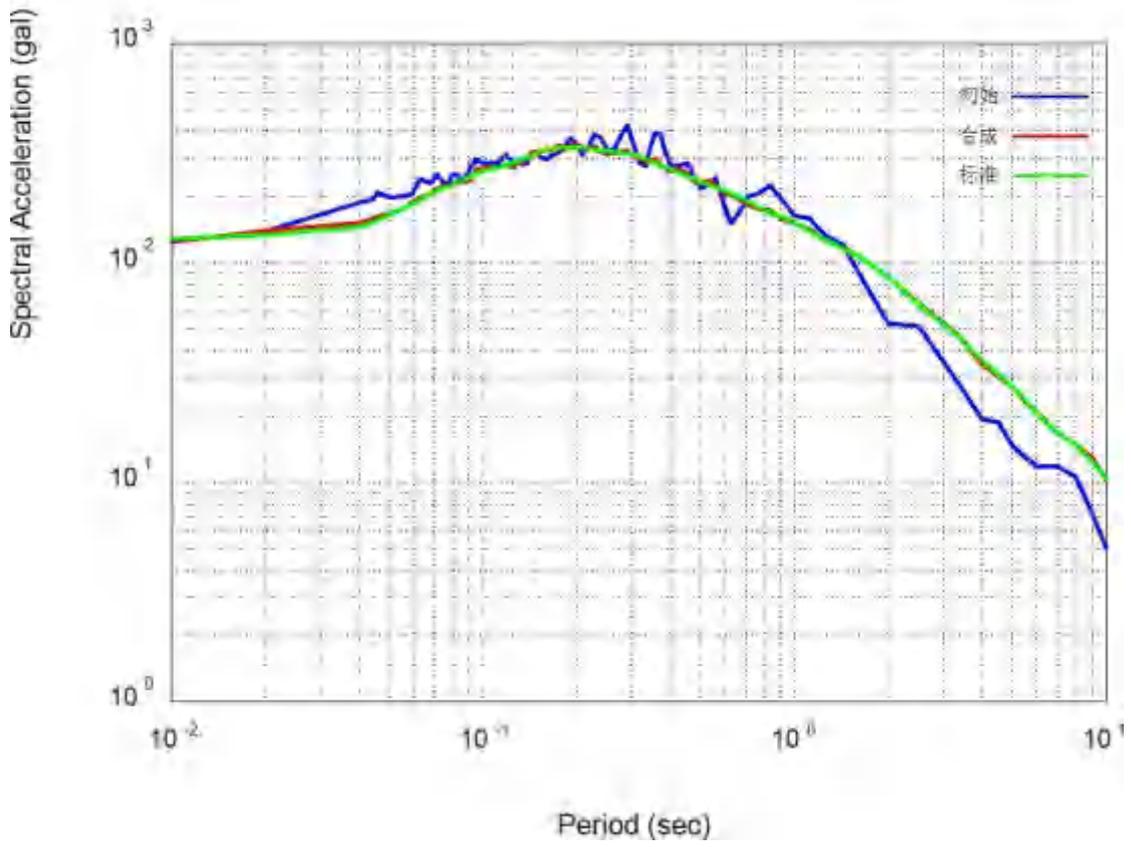


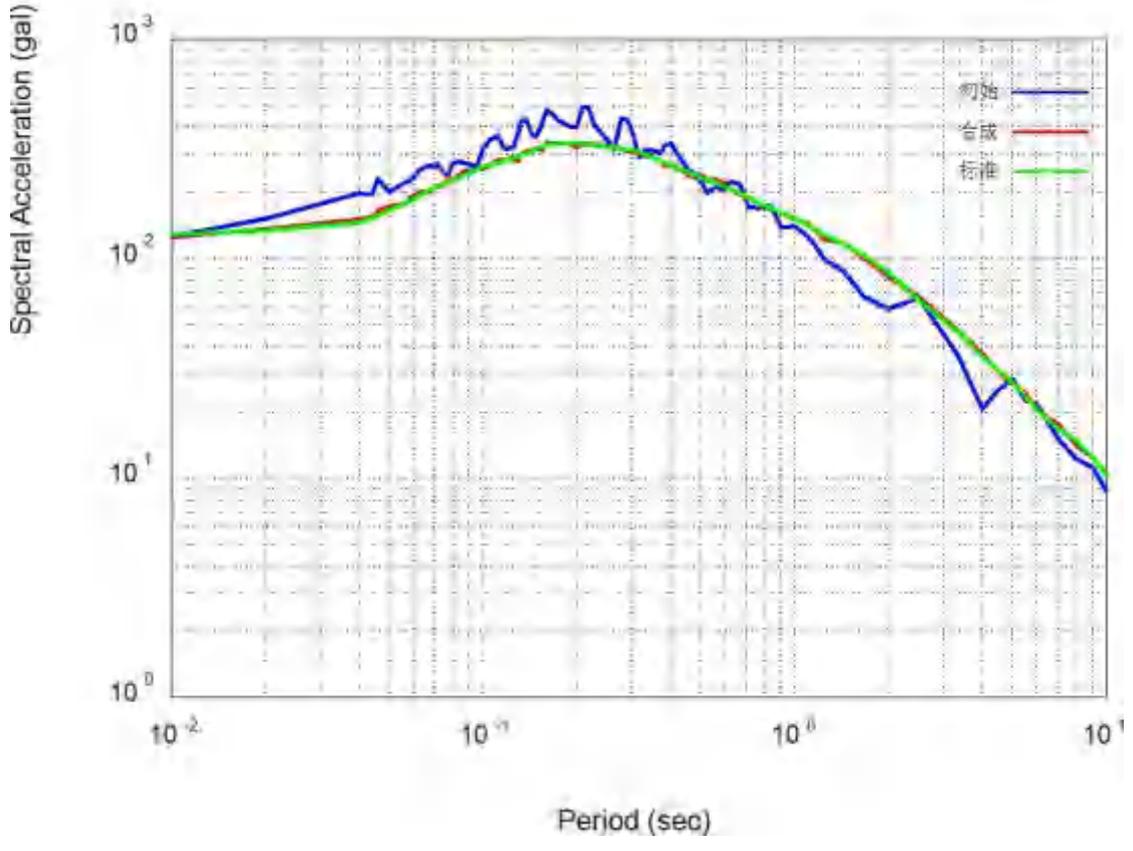
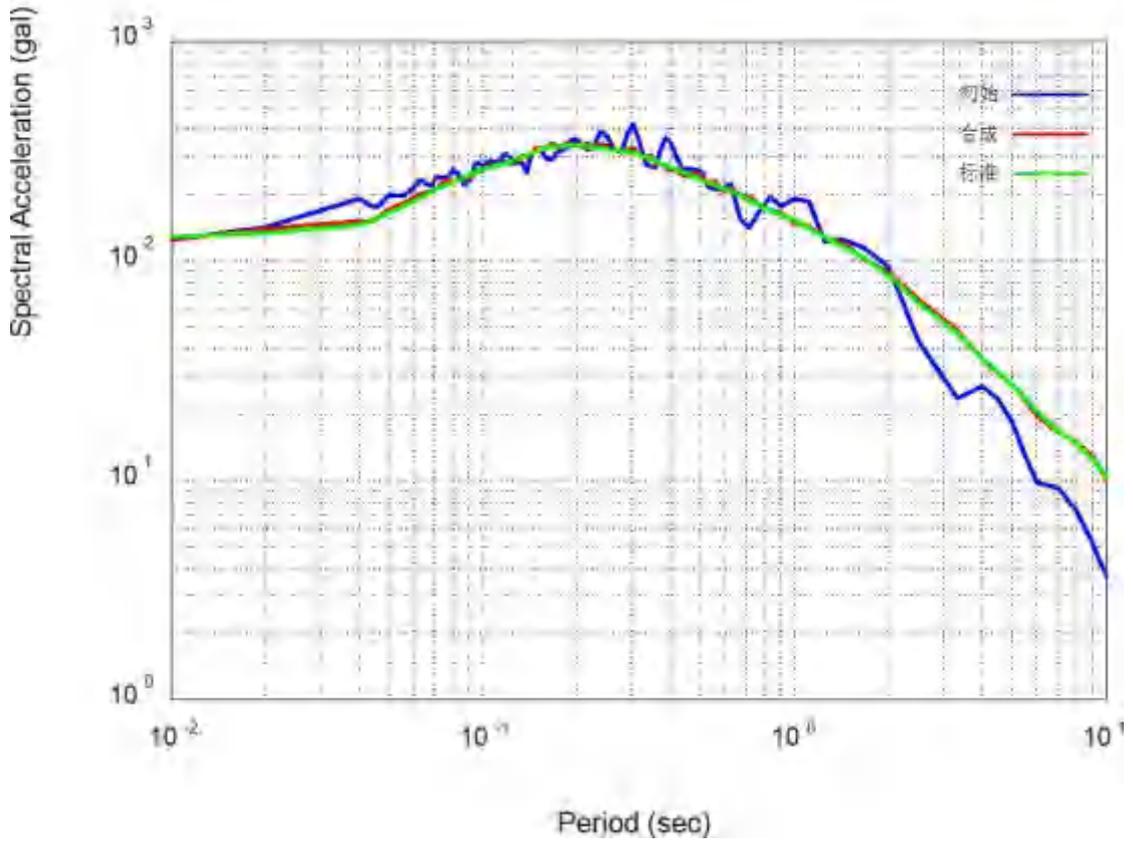
图 6.1.1E (zk64)基岩加速度、速度、位移时程及拟合反应谱曲线与目标谱的对比图(100年超越概率 10%)











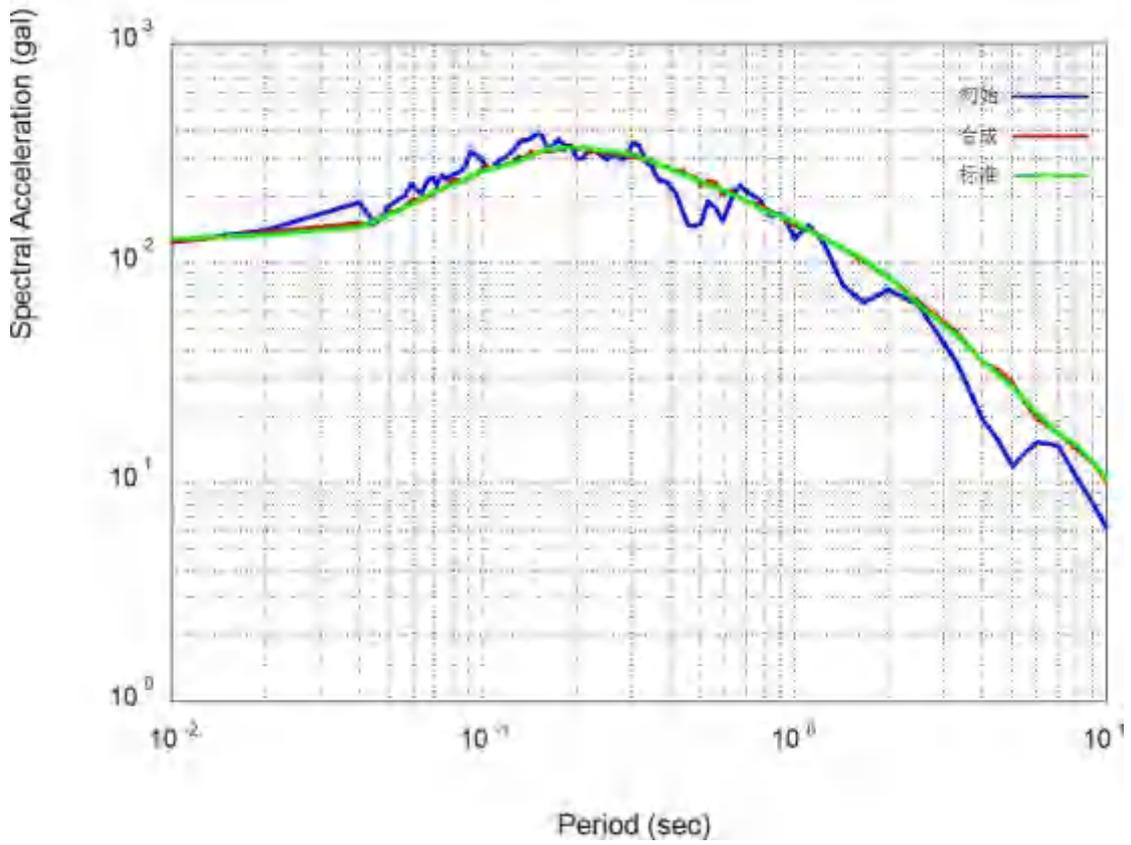


图 6.1.1F (zk64)基岩加速度、速度、位移时程及拟合反应谱曲线与目标谱的对比图(100年超越概率 2%)

