

濮阳经济技术开发区
区域地震安全性评价报告

河南省地球物理空间信息研究院地震工程分院

二〇二一年三月

项目名称：濮阳经济技术开发区区域地震安全性评价报告

承担单位：河南省地球物理空间信息研究院地震工程分院

院 长：陈双华

总 工：刘卫

单位地址：郑州市管城区新郑路 3 号

项目负责人：孙禹成

项目总技术负责人：邓国成

专业技术负责人

地震构造评价：刘卫

地震活动性评价：介伟

工程场地地震影响评价：张宏伟

主要完成人：刘 卫 邓国成 张宏伟 介 伟 于 水
宋战旺 孙禹成 吴晓瑞 李廷宾 毕张奇

2021 年 3 月 10 日

目 录

0 前 言.....	1
0.1 工程概况.....	1
0.2 主要任务.....	1
0.3 工作依据.....	2
0.4 技术思路.....	3
0.5 主要野外工作量统计.....	4
0.6 致谢.....	5
1 地震活动性.....	6
1.1 地震资料.....	6
1.2 区域地震的空间分布特征.....	8
1.3 地震活动的时间分布特征.....	11
1.4 历史破坏性地震对目标区的影响.....	14
1.5 区域现代构造应力场特征.....	23
1.6 近场区地震活动性.....	24
1.7 地震活动环境评价.....	26
2 区域地震地质环境.....	27
2.1 区域大地构造概述.....	27
2.2 地球物理场和深部构造及其与地震的关系.....	28
2.3 区域新构造特征及其与地震活动的关系.....	31
2.4 区域主要断裂活动特征及其与地震活动的关系.....	35
2.5 区域地震地质环境分析.....	44
3 近场区地震构造特征.....	48
3.1 近场区地质构造概况.....	48
3.2 近场区新构造运动特征.....	49
3.3 近场区主要断裂活动性.....	56
3.4 近场区地震构造环境评价.....	61
4 地震危险性分析.....	62
4.1 地震危险性分析方法概述.....	62
4.2 潜在震源区的划分.....	63

4.3 地震活动性参数的确定.....	67
4.4 地震动衰减关系.....	71
4.5 目标区地震危险性分析结果.....	74
5 场地工程地震地质条件.....	77
5.1 场地地形地貌.....	77
5.2 岩土构成与特征.....	77
5.3 波速测试和场地类别.....	77
5.4 场地土动力学参数测定.....	83
5.5 场地地震地质灾害评价.....	83
6 工程场地地震动参数确定.....	85
6.1 数学模型的选用.....	85
6.1 基岩的人造地震动时程.....	92
6.2 地震反应分析计算结果.....	100
7 结论与使用说明.....	104
7.1 地震活动性分析结果.....	104
7.2 区域地震地质研究结果.....	104
7.3 近场地震构造研究结果.....	105
7.4 地震危险性分析.....	105
7.5 场地工程地震条件和地震地质灾害.....	105
7.6 工程场地设计地震动参数.....	105
7.7 使用说明.....	106
8 主要参考文献.....	107

0 前 言

0.1 工程概况

濮阳经济技术开发区成立于 1992 年 9 月，是首批省级开发区、省级高新技术产业开发区，2006 年 3 月国家发改委审核为河南濮阳经济开发区，2013 年 1 月国务院批准升级为国家级经济技术开发区。产业集聚区面积 21.59 平方公里。现辖王助镇、新习镇、胡村乡、皇甫办、昆吾办、濮上办、濮水办（筹）、幸福办（筹）、华安办（筹），共两镇一乡六个办事处，132 个行政村、12 个居委会。拥有荣获全国首家国家火炬计划生物化工产业基地、国家外贸转型升级专业型示范基地、国家经济技术开发区、国家循环化改造示范试点园区、国家农业科技园区、国家新型工业化（化工）产业示范基地、国家中小企业创新服务先进园区、国家资源循环利用基地 8 块“国字号”金字招牌。塑造了良好的对外形象，提升了区域综合竞争力。

本次工作的目标区——濮阳经济技术开发区，目标区中心坐标为：东经 $114^{\circ}57'32''$ ，北纬 $35^{\circ}45'74''$ 。



图 0.1 目标区位置示意图

0.2 主要任务

受濮阳经济技术开发区管理委员会的委托，河南省地球物理空间信息研究地震工程分院承担了该区域性地震安全性评价工作。

根据本项目合同书规定的任务和要求，并依据国家标准《工程场地地震安全性评价》(GB 17741-2005)和《区域性地震安全性评价工作大纲(试行)》(中震防函〔2019〕21号)，确定本项目的主要工作内容如下：

- (1) 目标区所处区域及近场区域地震活动性进行评价；
- (2) 目标区所处区域及近场区域地震构造环境进行评价；
- (3) 确定地震统计区地震活动性参数；
- (4) 划分目标区周围的潜在震源区，并确定其地震活动性参数；
- (5) 确定适合本地区和本工程特点的地震动峰值加速度衰减关系；
- (6) 完成目标区50年和100年超越概率分别为63%、10%和2%的地震危险性分析，确定相应场地基岩峰值加速度与反应谱；
- (7) 完成目标区地震工程地质条件勘测工作，包括工程钻探、现场原位波速测试，以及土样动力学参数实验；
- (8) 完成各工程场地土层地震反应分析；
- (9) 综合确定目标区50年和100年超越概率分别为63%、10%和2%的水平向场地地震动参数；依据计算结果进行地震动加速度分区和场地特征周期分区。
- (10) 完成目标区的地震地质灾害评价；

0.3 工作依据

本项工作主要依据下列法规、标准和规范：

- 《中华人民共和国防震减灾法》（2008）
《地震安全性评价管理条例》（2019）
国家标准《工程场地地震安全性评价》（GB17741-2005）
《区域性地震安全性评价工作大纲(试行)》(中震防函〔2019〕21号)
《河南省区域性地震安全性评价工作技术大纲(试行)》
国家标准《建筑工程抗震设防分类标准》（GB 50223-2008）
国家标准《岩土工程勘察规范》（GB50021-2001，2009版）
国家标准《构筑物抗震设计规范》（GB 50191-2012）
国家标准《中国地震动参数区划图》（GB 18306-2015）
国家标准《建筑抗震设计规范》（GB 50011-2010，2016版）

国家标准《活动断层探测》（GB 36072-2018）

双方合同约定的工作内容

0. 4 技术思路

1. 工作等级

根据国家标准《工程场地地震安全性评价》（GB 17741-2005）的规定和《区域性地震安全性评价工作大纲（试行）》（中震防函〔2019〕21号），本项目地震安全性评价工作属于区域性地震安全性评价工作。

2. 工作范围

评价区域定为目标区，以目标区为中心，外延不少于150km的范围为区域范围；以目标区为中心，外延不少于25km的范围为近场工作范围。结合目标区区域和近场区地震构造和地震活动性特征，工作范围取值如下：

区 域：北纬 $34^{\circ}22' \sim 37^{\circ}08'$ ，东经 $113^{\circ}14' \sim 116^{\circ}39'$ ；

近场区：北纬 $35^{\circ}29' \sim 36^{\circ}00'$ ，东经 $114^{\circ}37' \sim 115^{\circ}17'$ 。

3. 技术途径

本报告主要依据区域性地震安全性评价技术要求开展工作。主要工作流程见图0.4。

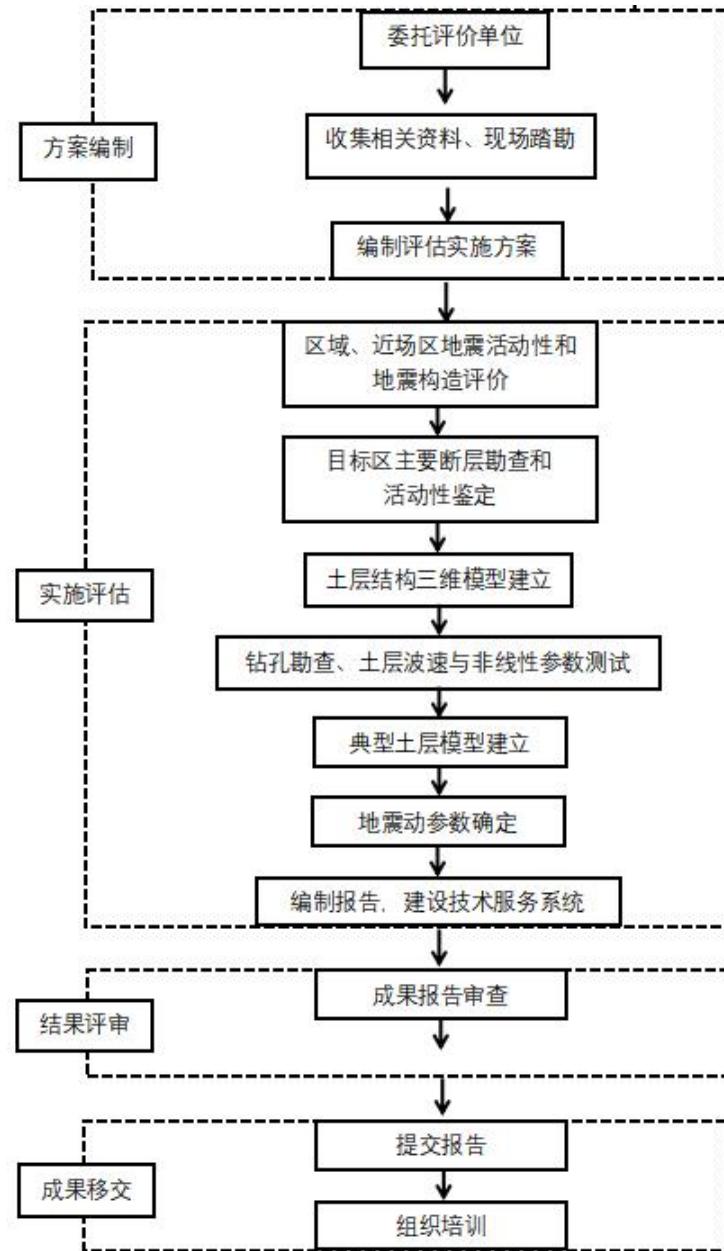


图 0.4 工作流程图

0.5 主要野外工作量统计

本项目在收集、整理已有区域及近场区地震地质工作成果的基础上，对目标区进行了地震工程地质条件勘测。结合本工程特点、考虑场地条件，在目标区内布置了 50 个钻孔，进行原位剪切波速测试，点距 1m。钻孔深度均终孔于土层剪切波速不小于 500m/s 处。野外工作内容见表 0.5。

表 0.5 野外工作量统计表

序号	工作内容	单位	数量
1	野外地质考察	人·天	30
2	钻孔	个	50
3	剪切波速测试孔	孔	50
4	物探剖面	Km	20
5	动三轴实验	组	270

0.6 致谢

在本项目实施过程中得到了濮阳经济技术开发区管理委员会等相关单位的支持和帮助。项目组向上述单位和相关人员表示感谢！

本项目工作参考和利用了河南省地震局、中国地震局地质研究所、中国地震局地球物理研究所等有关单位的相关研究和研究成果，项目组向涉及到的单位和个人表示感谢！

1 地震活动性

本章依据历史地震资料和现代地震观测资料，开展地震活动性分析。通过分析区域范围内地震活动的时间和空间特征、历史地震破坏性地震对工程场地的影响以及区域现代构造应力场特征等，为合理划分潜在震源区及确定地震活动性参数提供依据。

1.1 地震资料

1.1.1 地震资料的地域范围

根据规范的要求，并结合目标区区域和近场地震活动性分析的要求，地震资料的地域范围确定如下：

区域：北纬 $34^{\circ}22' \sim 37^{\circ}08'$ ，东经 $113^{\circ}14' \sim 116^{\circ}39'$ ；

近场区：北纬 $35^{\circ}29' \sim 36^{\circ}00'$ ，东经 $114^{\circ}37' \sim 115^{\circ}17'$ 。

1.1.2 资料来源

本次工作中用于地震活动性分析的资料包括两部分。第一部分是 $M \geq 4.7$ 级的历史破坏性地震目录。这部分资料 1970 年以前的目录主要取自中国地震局震害防御司《中国历史强震目录》(公元前 23 世纪—公元 1911 年)和《中国近代地震目录》(公元 1912 年—1990 年 $Ms \geq 4.7$)，1970 年以后的资料从中国地震台网中心编录的地震目录中续补，震级由公式 $M=1.13M_L-1.08$ 换算得出。

第二部分为现代地震目录。这部分资料取自中国地震台网中心编录的地震目录，目录中的地震参数是根据仪器记录得到的。本次工作收集、整理了区域范围内 $M_L \geq 3.0$ 级、近场范围内 $M_L \geq 2.0$ 级的地震资料。

1.1.3 区域地震资料完整性和可靠性分析

区域位于我国历史上经济和文化较发达的地区，有着比较丰富和完整的史料记载，因此相对而言该区历史资料较完整可靠。据黄玮琼 (1994) 研究成果，区域自 1484 年以来 $M \geq 4.7$ 级的地震基本完整。但为了使采用的地震资料更具有完整性、可靠性，根据具体情况采用了不同的可信时间域和震级域。

尽管 1970 以后已有区域台网记录的 $M_L \geq 1.0$ 级地震目录，但相对而言 1976 年以后才逐渐形成较完善的地震监测台网，根据焦元碧、吴开统等人的研究结果 (1990)，区域 1989 年之后处于 $M_L \geq 3.0$ 级地震的有效监测范围内。因此，结合不同时期监控地

震的能力，对于现代地震，本项目中采用 $M_L \geq 3.0$ 级地震是较为合适的。

根据上述资料，列出了区域范围内 $M \geq 4.7$ 级地震的目录。需要说明的是，震中精度分类所对应的误差的含义在 1970 年前后是不同的。1970 年以前地震的精度分类的含义是：1 类震中误差 $\leq 10\text{km}$ ；2 类震中误差 $\leq 25\text{km}$ ；3 类震中误差 $\leq 50\text{km}$ ；4 类震中误差 $\leq 100\text{km}$ ；5 类 $> 100\text{km}$ 。1970 年以后地震的精度分类的含义是：1 类震中误差 $\leq 5\text{km}$ ；2 类震中误差 $\leq 10\text{km}$ ；3 类震中误差 $\leq 30\text{km}$ ；4 类震中误差 $> 30\text{km}$ 。

1.1.4 区域地震资料的基本概况

区域自公元元年至 2020 年 12 月共记载 $M \geq 4.7$ 级地震 40 次，其中 $4.7 \sim 4.9$ 级地震 11 次； $5.0 \sim 5.9$ 级地震 19 次； $6.0 \sim 6.9$ 级地震 9 次； $7.0 \sim 7.9$ 级地震 1 次，为 1937 年 8 月 1 日山东菏泽 7 级地震，最新地震为 2010 年太康 5.1 级地震。

1970~2020 年 12 月仪器共记录到 $M_L \geq 3.0$ 级地震 189 次，其中 $3.0 \sim 3.9$ 级地震 164 次； $4.0 \sim 4.9$ 级地震 20 次； $5.0 \sim 5.9$ 级地震 4 次； $6.0 \sim 6.9$ 级地震 1 次，为 1983 年 11 月 7 日山东菏泽 $M_L 6.3$ 级地震。区域各震级档地震频次见表 1.1.1。

区域历史上记载最早的破坏性地震为公元 294 年河南襄城东 $5\frac{1}{2}$ 级地震，公元元年至 2014 年 6 月区域破坏性地震目录 ($M \geq 4.7$ 级) 见表 1.1.2。

表 1.1.1 区域地震频次统计表

破坏性地震统计 (1~2020.12)	震级档次(M)	$4.7 \sim 4.9$	$5.0 \sim 5.9$	$6.0 \sim 6.9$	$7.0 \sim 7.9$
	地震次数	11	19	9	1
现代地震统计 (1970~2020.12)	震级档次(M_L)	$3.0 \sim 3.9$	$4.0 \sim 4.9$	$5.0 \sim 5.9$	$6.0 \sim 6.9$
	地震次数	164	20	4	1

表 1.1.2 区域破坏性地震目录 (1~2020.12, $M \geq 4.7$)

编号	地震时间 (年.月.日)	震中位置		震级 (M)	精度	震中烈度	震中地名
		北纬(°)	东经(°)				
1	294.12.-	33.7	114.2	$5\frac{1}{2}$	5		河南襄城东
2	344.12.-	35.4	114.3	6	3	VIII	河南卫辉东
3	462.08.17	34.8	117.0	$6\frac{1}{2}$	4	VIII	山东兗州南
4	925.11.18	34.7	116.7	$5\frac{3}{4}$	4		江苏徐州西北
5	1342.04.23	34.5	114.5	$4\frac{3}{4}$	3	VI	河南通许
6	1481.03.18	33.5	116.2	6	4		安徽亳州南
7	1485.03.25	35.8	117.0	5	3		山东泰安南
8	1493.05.04	35.5	115.2	$5\frac{1}{4}$	4		河南濮城西南
9	1502.10.27	35.7	115.3	$6\frac{1}{2}$	2	VIII	河南濮城
10	1504.08.24	34.4	114.2	$4\frac{3}{4}$	4		河南杞县西南
11	1519.11.23	33.5	114.1	5	3		河南临颖、上蔡间
12	1520.09.01	35.8	115.8	$5\frac{1}{4}$	3		山东郓城西北
13	1522.02.07	34.2	114.1	$5\frac{3}{4}$	3	VII	河南鄢陵、洧川一带
14	1524.02.14	34.0	114.1	6	3	$\geq VII$	河南许昌张潘店一带
15	1525.09.13	33.8	115.4	$5\frac{3}{4}$	4		河南太康东南

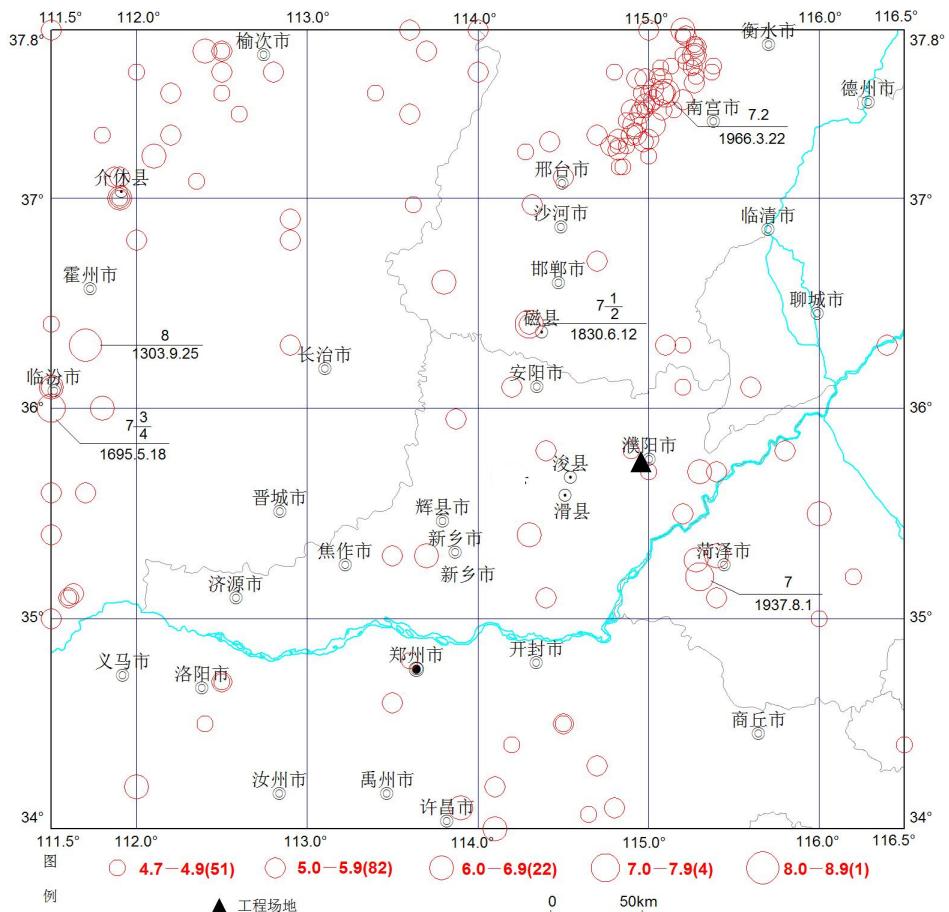
16	1525. 10. 12	33. 9	115. 7	$5\frac{1}{2}$	4		安徽凤阳西北
17	1527. 01. -	35. 8	114. 9	$4\frac{3}{4}$	3		河南濮阳西北
18	1594. 03. 24	34. 3	114. 7	5	4		河南通许东南
19	1622. 03. 18	35. 5	116. 0	6	2	VIII	山东郓城南
20	1642. 10. 04	34. 2	116. 9	$4\frac{3}{4}$	2	VI	安徽萧县
21	1643. 10. 23	34. 2	116. 8	$4\frac{3}{4}$	3		安徽萧县西北
22	1644. 01. 15	34. 4	116. 5	$4\frac{3}{4}$	3		安徽砀山东
23	1644. 02. 08	32. 9	117. 5	$5\frac{1}{2}$	2	VII	安徽凤阳
24	1660. 09. -	35. 2	116. 2	$4\frac{3}{4}$	4		山东金乡西北
25	1662. 10. 11	33. 2	114. 8	$5\frac{1}{2}$	2	VII	河南项城
26	1675. -. -	34. 1	114. 8	$5\frac{1}{2}$	3	VII	河南太康
27	1675. 08. 03	35. 6	116. 8	5	4	VI	山东兗州
28	1737. 09. 30	35. 1	114. 4	$5\frac{1}{2}$	2	VII	河南封丘
29	1814. 02. 04	35. 8	114. 4	$5\frac{1}{2}$	3	VII	河南汤阴、浚县间
30	1820. 08. 04	34. 1	113. 9	6	2	VIII	河南许昌东北
31	1830. 05. 02	35. 7	115. 0	$4\frac{3}{4}$	3		河南濮阳
32	1918. 08. 09	34. 5	114. 5	$5\frac{1}{4}$		VI	河南通许
33	1923. 09. 16	35. 7	115. 4	5		VI	河南范县濮城
34	1937. 08. 01	35. 2	115. 3	7	2	IX	山东菏泽
35	1937. 08. 01	35. 3	115. 4	$6\frac{3}{4}$	2	VIII	山东菏泽
36	1948. 05. 29	35. 1	115. 4	$5\frac{1}{2}$	3		山东菏泽附近
37	1979. 03. 02	33. 18	117. 42	4. 9	1	VI	安徽固镇
38	1980. 08. 02	35. 95	113. 87	4. 7	1	VI	河南林州东南
39	1983. 11. 07	35. 28	115. 28	6. 0	1	VII+	山东菏泽
40	2010. 10. 24	34. 07	114. 65	4. 7	1	VI	河南太康

1. 2 区域地震的空间分布特征

1. 2. 1 震中分布特征

区域破坏性地震在空间分布上呈现出不均匀性，地震活动北强南弱，6级以上地震大部分发生在区域的北部。范县-菏泽一带地震活动水平较高，发生6级以上地震多次，最大地震震级为7级；许昌、通许、太康一带属中强地震活动区，地震活动较为频繁，发生6级地震2次（图1.2.1）。

图1.2.2为1970年以来区域 $M_L \geq 3.0$ 现代地震震中分布图。从图中可以看出，区域现代地震活动在空间分布上呈现出不均匀性，地震活动仍是北强南弱，与4.7级以上历史破坏性地震分布基本一致，说明现代小震活跃区仍可能是未来强震发生的地区。范县-菏泽一带地震丛集特征明显，呈团簇状分布；安徽蚌埠东北部地震呈团簇状分布，为1979年3月安徽固镇4.9级地震的余震。其他地区地震分布比较分散。

图 1.2.1 区域破坏性地震震中分布图(1~2020.12, $M \geq 4.7$)

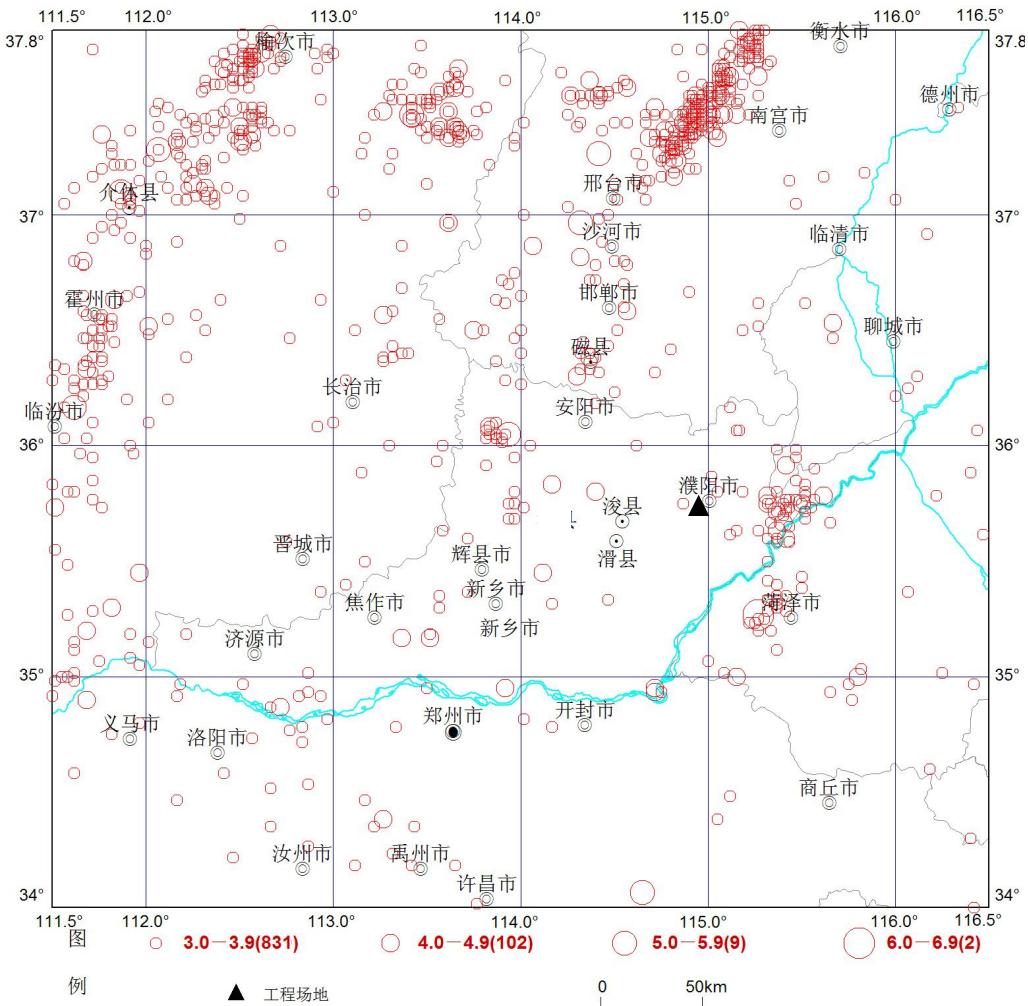


图 1.2.2 区域现代地震震中分布图(1970~2020.12, $M_L \geq 3.0$)

1.2.2 震源深度分布特征

历史地震记载是没有震源深度的，只有仪器记录的地震才有可能测定此参数。根据区域 1970 年以来有震源深度参数 $M_i \geq 3.0$ 的 133 次地震统计结果（表 1.2.1），区域内地震震源深度主要分布在 6~20km 范围内，约占总数的 81%（图 1.2.3）。总体来看，区域的地震基本上是发生在地壳中上层的浅源地震。

表 1.2.1 区域地震震源分布情况

震源深度 (km)	1~5	6~10	11~15	16~20	21~25	26~30	>30
地震次数	8	51	35	22	12	4	1
百分比 (%)	6	38	26	17	9	3	1

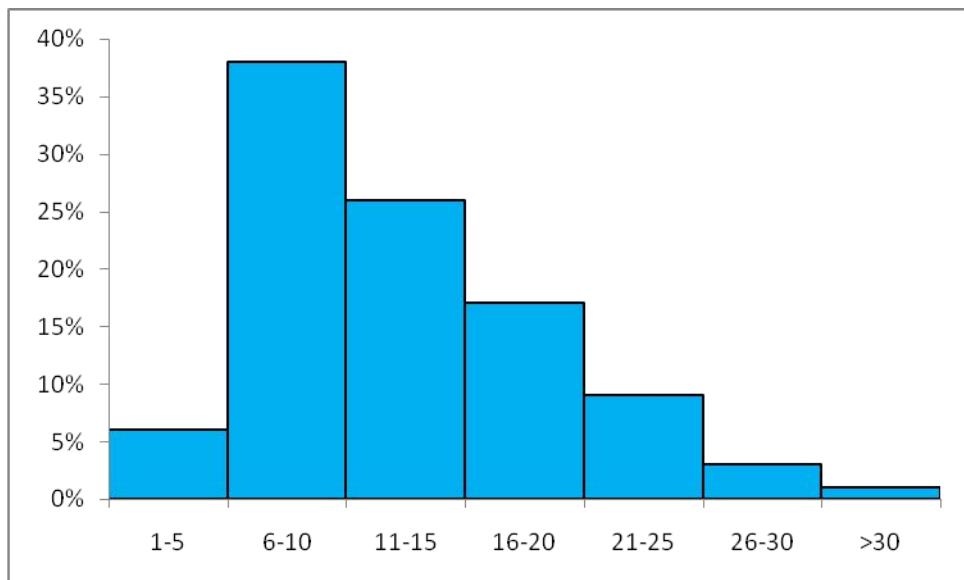


图 1.2.3 区域地震震源深度分布直方图

1.3 地震活动的时间分布特征

1.3.1 地震区、带划分

我国地震活动具有密集或成带分布的特点，不同地震区、带其地震活动特征不同。在地震区划工作中，根据这种地震活动空间不均一性，并考虑到其与构造活动、地壳结构之间的关系进行了区、带的划分。

地震带是分析地震时间分布特征、估计未来百年地震活动趋势和地震危险性分析中估计地震活动性参数的基本统计单元。在本项工程中，采用的是编制新一代全国地震区划图使用的地震区、带划分方案。区域涉及到华北平原地震带和郯庐地震带，目标区位于华北平原地震带内。

1.3.2 地震带地震时间分布特征

同一地震带的地震活动在时间分布上是不均匀的，一般表现出明显的周期性或似周期性。研究表明，一个地震带内的地震活动在时间分布上有的时段地震频度低，震级小，表现为相对平静状态；有的时段地震频度高，震级大，表现为显著活动状态，而且地震活动的相对平静阶段和显著活动阶段周期性地重复着。人们将地震活动的这种周期性称为地震带的地震活动周期。

1、华北平原地震带地震活动时间特征

该带呈北北东向展布，南界大致位于襄阳-武汉一线，北界位于燕山南侧，西界位于太行山东侧，东界位于下辽河-辽东湾拗陷的西缘，向南延到天津东南，经济南东、亳州达红安、麻城一带。本带记录最早的一次地震是公元前 1767 年偃师西南的 6 级地

震，最大地震是 1679 年河北三河平谷 8 级地震。据统计，该带记录到 6.0~6.9 级地震 29 次，7.0~7.9 级地震 5 次，8.0~8.9 级地震 1 次，为 1679 年河北三河平谷 8 级地震。

图 1.3.2 为华北平原地震带 1400 年以来 $M \geq 5.0$ 地震的序列图和应变释放曲线。由图可以看出，华北平原地震带自 1400 年以来经历了两个活跃期和一个平静期。具体划分为：1480~1679 年为活跃期；1680~1829 年为平静期；1830 年至今为又一活跃期，后一活跃期 5 级以上地震的发震频率较高。1966 年后该带发生了一系列强震，1976 年唐山 7.8 级地震后，华北平原地震带总体已转入能量剩余释放阶段，估计未来百年内该地震带将处于本次活跃期剩余能量释放阶段和下一个活跃期应变积累阶段，地震活动水平不高，但仍存在发生 6 级以上地震的可能。

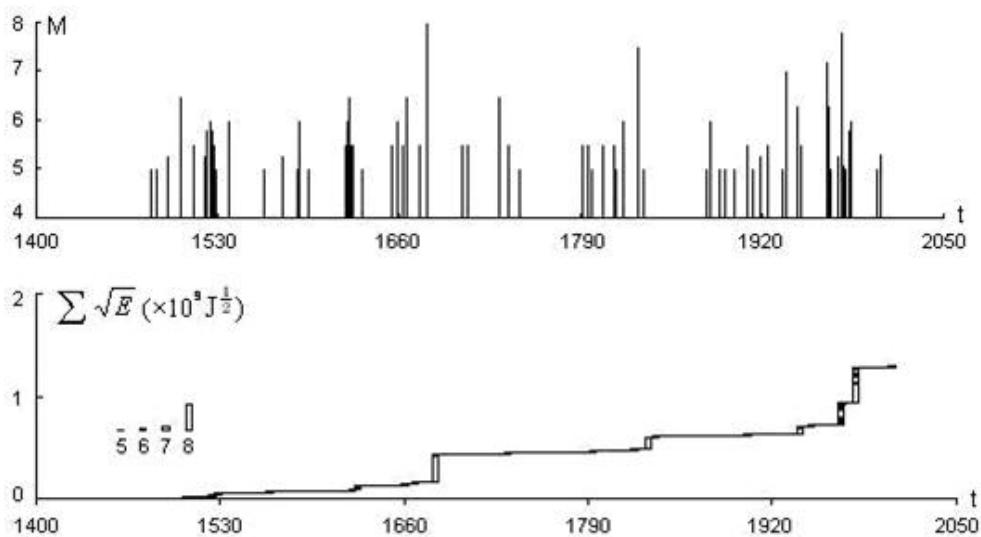


图 1.3.2 华北平原地震带的 M-t 图和应变释放曲线 ($M \geq 5.0$)

2、郯庐地震带地震活动时间特征

郯庐地震带是我国东部规模最大的地震带。该带沿郯庐深大断裂展布并包括郯庐断裂带两侧及其邻近地区与平行或斜交的次级断裂。该带呈北北东走向，贯穿整个中朝断块区和华北地台区的东部。本带记录最早的一次地震是公元前 70 年 6 月 1 日安丘 7 级地震，据统计，本带历史记录到 6.0~6.9 级地震 14 次，7.0~7.9 级地震 6 次，8.0~8.9 级地震 1 次，即 1668 年山东郯城 $8\frac{1}{2}$ 级大地震。这些地震大多发生在北北东向活动断裂与北西向活动断裂的交汇部位。尤其是在郯庐断裂带与燕山渤海断裂带交汇的渤海区域，历史上发生过 4 次 7 级以上强震。

图 1.3.3 为郯庐地震带 1400 年以来 $M \geq 5$ 级地震的序列图和应变释放曲线。1400 年以来的 5 级以上地震资料表明，该带目前经历了两个活跃期和一个平静期。1540 年

至 1675 年为第一个活跃期，曾发生 7 级以上地震 3 次，6.0~6.9 级地震 5 次，其中 1668 年 7 月 25 日郯城 $8\frac{1}{2}$ 级大震是该带历史上发生的最大地震；1676 年至 1828 年为平静期；1829 年至今又一活跃期，已经发生 7 级以上地震 3 次，6.0~6.9 级地震 7 次。后一活跃期 5 级以上地震的年平均发生率与前一活跃期相等，均为 0.2 次/年。从地震频次来看，前后两个地震活跃期基本相当，但所释放的能量还有相当差距，根据 b 值、极值理论等研究结果，该带还缺一些中、强地震，因此该带未来百年地震活动仍较活跃。

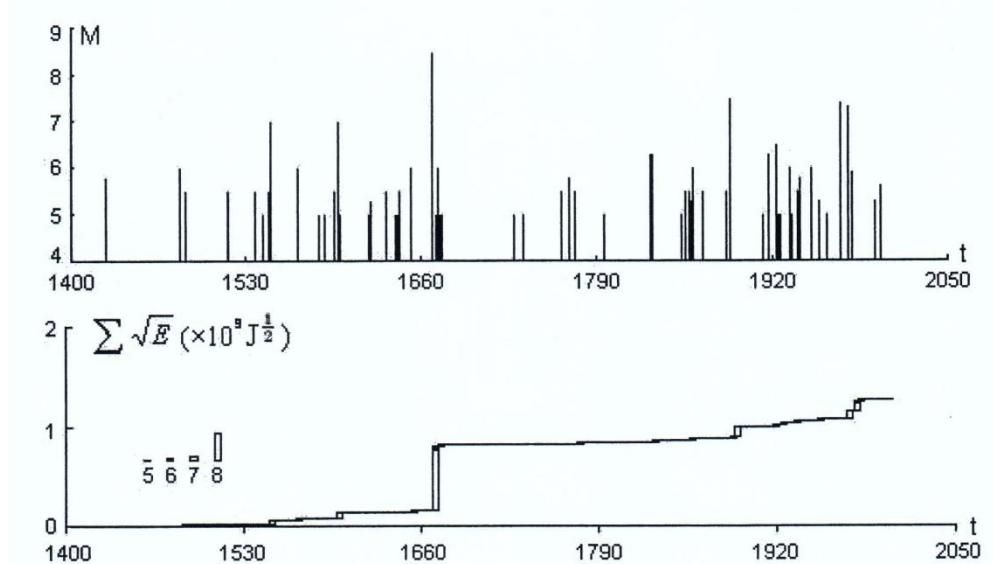
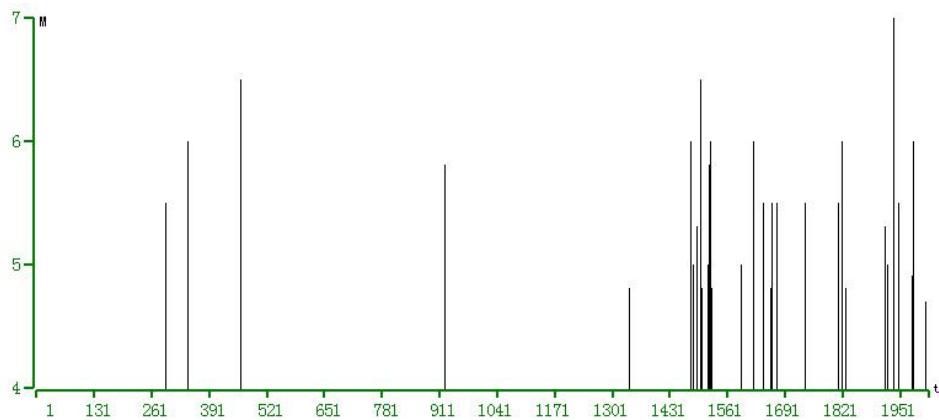
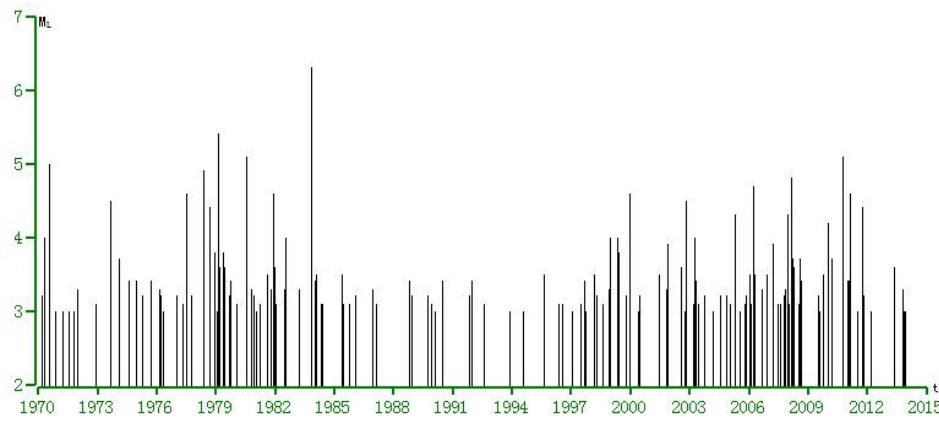


图 1.3.3 郯庐地震带 M-t 图和应变释放曲线 ($M \geq 5.0$)

1.3.3 区域地震的时间分布特征

从表 1.1.1 区域历史破坏性地震目录可知，区域从最早有地震记载的公元前 1767 年至 1480 年，共记载到 5 次 $4\frac{3}{4}$ 级以上地震。早期地震记录缺失严重，1481 年之后地震记录明显增多。图 1.3.4 为区域公元元年至 2020 年 12 月 $M \geq 4.7$ 级地震的 M-t 图。从图中可以看出，1481 年以来，区域内地震活动经历了两个活跃期。具体分期为：1481 年至 1675 年为活跃期；1814 年至今为又一活跃期，与华北地区的地震活跃期基本一致。

区域现代地震活动周期不明显（图 1.3.5）。

图 1.3.4 区域破坏性地震 M-t 图 (1~2020.12, $M \geq 4.7$)图 1.3.5 区域现代地震 M-t 图 (1970~2020.12, $M_L \geq 3.0$)

1.4 历史破坏性地震对目标区的影响

分析历史破坏性地震对工程场地的影响，是本项工程地震安全评价的重要组成部分。本报告将从两个方面来分析地震影响情况，一是根据现有的历史地震等震线资料，给出它们对工程场地的实际影响烈度；另一方面是应用地震烈度衰减关系式，计算历史地震对它们的影响烈度值。

1.4.1 历史破坏性地震影响

对目标区造成较大影响 ($\geq V$ 度) 的历史破坏性地震事件共计 12 次，见表 1.4.1，对其中几个较大的破坏性地震的影响情况简述如下：

1、1303 年 9 月 25 日山西赵城、洪洞 8 级地震

据记载：“太原、平阳二路尤甚，坏官民庐舍十万计，宫观摧圮者 1400 余区；山摧阜移，村堡移徙，地裂成渠，赵城、洪洞、临汾三县之利泽渠圮坏；压死者 20 余万（或说死十万有余），伤数十万人”。

“赵城：本县尤重，靡有孑遗，庙学圮，娲皇庙（东门外五里许侯村）倾圮，长春观（县南上纪落村）观洞屋庐摧圮，为之一空。上下渠堰陷坏，水不得通流。营田东北

山摧阜移，范宣义郇堡山移徙十余里，所过居民庐舍皆摧压倾圮。”

“洪洞：儒学震陷。广胜寺下寺摧毁殆尽，城隍祀倾，二者震后俱重建。城南渡涧二里附近安乐庙圮，济民渠（在汾州里）尔堤兑塌。甘亭乡北羊村三教庙扫地俱空，瓦砾可伤。淹底乡上张村灵睨殿殿宇崩坏。古罗乡上寨村三教庙倾圮。”

震中烈度为XI度，工程场地宏观影响烈度达V度（图 1.4.1）。

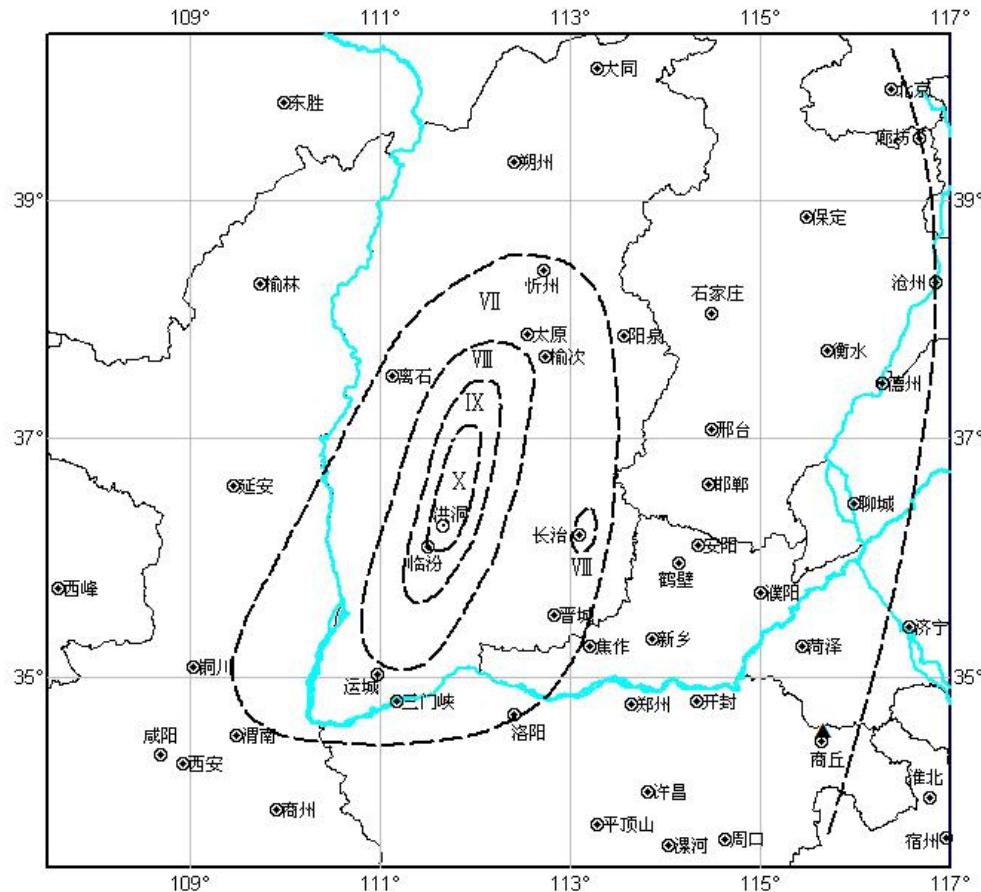


图 1.4.1 1303 年 9 月 25 日山西赵城、洪洞 8 级地震等震线图

2、1556年2月2日陕西华县 $8\frac{1}{4}$ 级地震

此次地震史称关中大地震，不仅在中国大陆，而且在全球是因地震死亡人数最多的一次地震。《嘉靖实录》载：“压死官吏军民奏报有名者八十三万有余，其不知名未奏报者复不可数计。”

“秦晋之交，地忽大震，声如万雷，川原坼裂，郊墟迁移，道路改观，树木倒置，阡陌更反。五岳动摇，寰宇震殆遍。陵谷变迁，起者成阜，下者成壑，或岗阜陷入平地，或平地突起山阜，涌者成泉，裂者成涧，地裂纵横如画，裂之大者水火并出。井泉涸废，新泉涌流，喷高丈余。山移河徙四五里，涌沙、陷没亘数千里。华县、渭南、华阴及朝邑、蒲州等处尤甚。郡城邑镇皆陷没，塔崩、桥毁、碑折断，城垣、庙宇、

官衙、民庐倾颓摧圮，一望丘墟，人烟几绝两千里；四处起火，数日火烟未灭；民天寒露处，抢掠大起。军民因压、溺、饥、疫、焚而死者不可胜计，其奏报有名者 83 万有奇，不知名者复不可数。”

“陕西、山西、河南三省 97 州县遭受破坏。波及陕西、山西、河南、甘肃、河北、山东、湖北、湖南、江苏、安徽等 11 省 130 余县。”

震中烈度为 XI 度，工程场地宏观影响烈度达 V 度(图 1.4.2)。

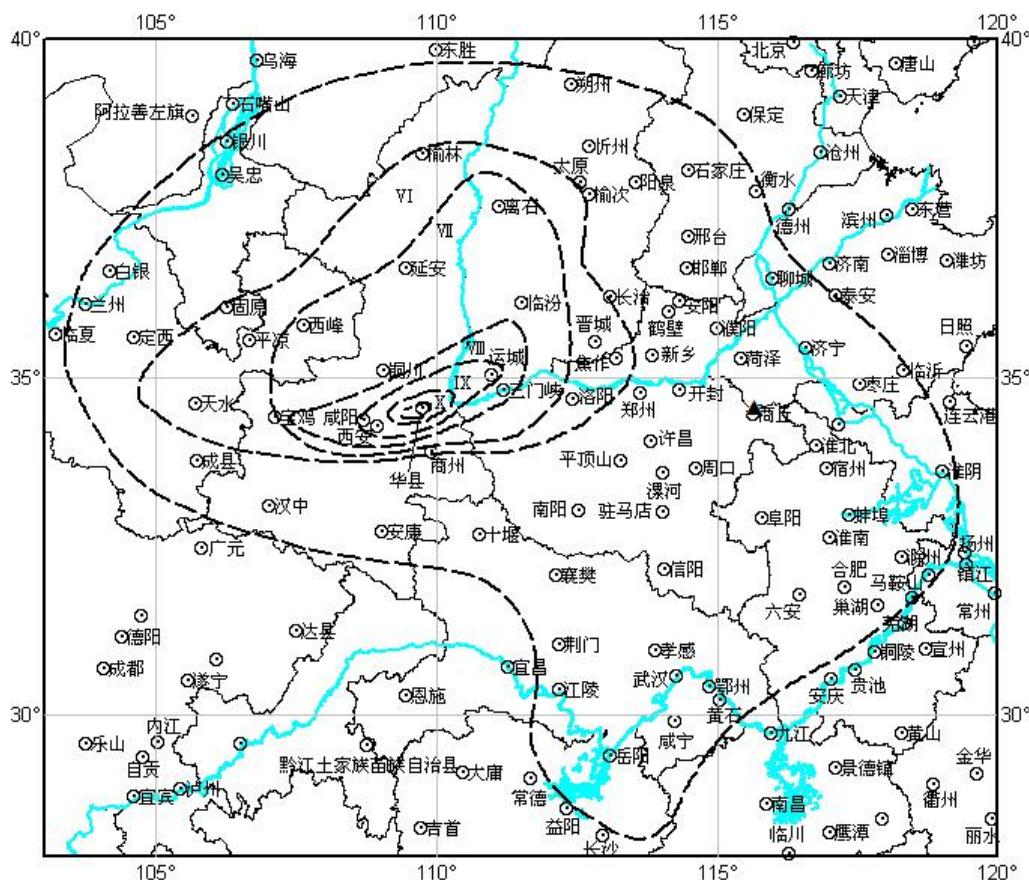


图 1.4.2 1556 年 2 月 2 日陕西华县 8 $\frac{1}{4}$ 级地震等震线

3、1668 年 7 月 25 日山东郯城 8 $\frac{1}{2}$ 级地震

据记载：“鲁、苏、浙、皖、赣、鄂、豫、冀、晋、辽、陕、闽诸省及朝鲜同时地震。山东郯城、沂州、莒州破坏最重。50 多万平方公里范围内的 150 多个州县遭受不同程度的破坏，有感半径 800 多公里。极震区内城廓、公廨、官民庐舍、庙宇等一时尽毁，郯城倒塌如平地，莒州百里无存屋，并伴有大规模的山崩地裂、地陷、涌水喷沙等现象。震时如舟覆，如桔槔上下，崩为堑，游为渊，沙涌并湮，地侧树偃，百谷陨箨。共压毙 5 万余人，死尸遍野，不能殓葬者甚多，凡值村落之处，腥臭之气达于四处。暴雨烈日，瘟疫随作，人民流散。”

“内黄：圮城堞 60 余所。滑县：兴国寺浮图圮。夏邑：房屋有倾圮者。开州（今濮阳）：楼房倾颓，人几不能立。”

震中位于山东郯城北，震中烈度 $\geq XI$ 。工程场地宏观影响烈度达Ⅷ度（图 1.4.3）。

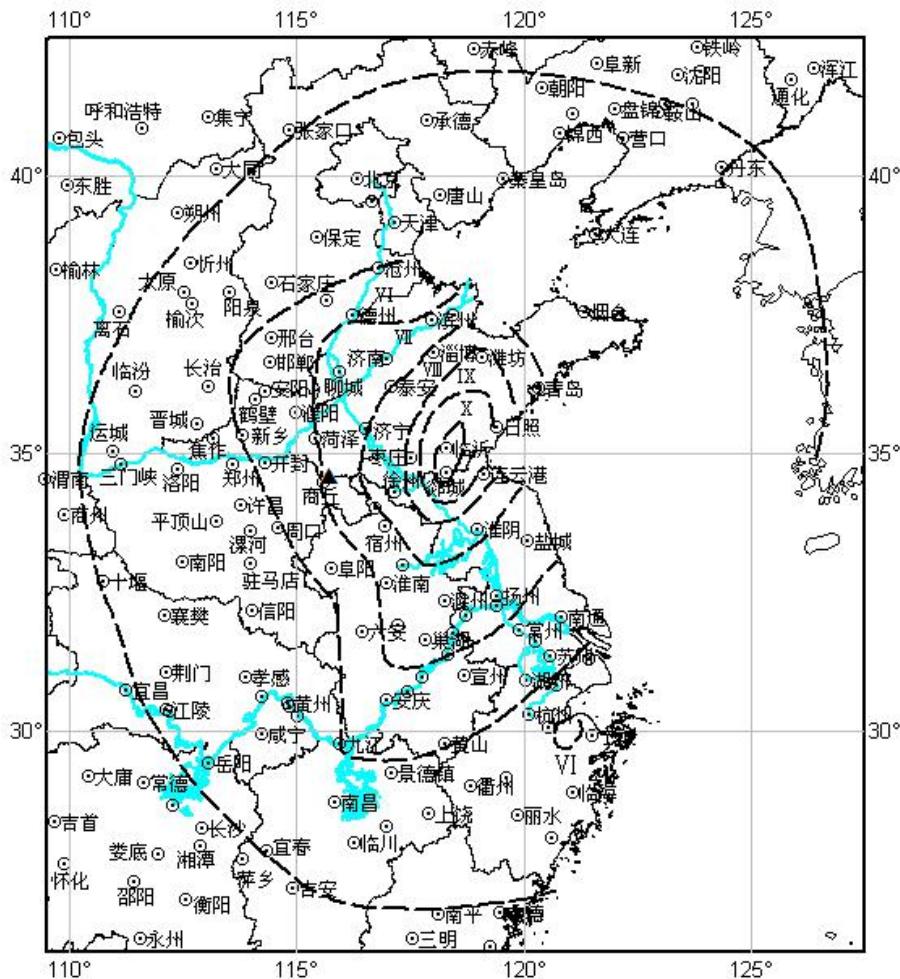


图 1.4.3 1668 年 7 月 25 日山东郯城 8 $\frac{1}{2}$ 级地震等震线图

4、1695 年 5 月 18 日山西临汾 7 $\frac{3}{4}$ 级地震

据史料记载：“平阳（治临汾）地震，临、襄、洪、浮四邑较彼一时，临汾尤甚，浮山三邑，城廓房舍存无二三（一说倾倒公私廨舍房屋 4 万余间），居民死伤十有七八（一说死毙人 52600 余名），有阖门尽毙不留一人者。地裂涌水，哮哭惊声日夜不绝，民皆露处，黠暴乘间剽掠。”

“临汾：府城并东关城垣、楼堞、衙署、神佛、庙宇、民舍、仓库尽行倒塌，压死城乡人民 27846 人。有阖门尽毙不留一人者、城内东关压死尤多。烈火烧天，黑水涌地。”

“延津：城堞崩颓数十丈，坏屋舍数十余间。获嘉：塘水涌出，庐舍倾颓。沁阳：屋瓦摇落，城东南西三面门楼皆损。温县：墙屋间有倾颓者。汤阴：房屋有坏者。洛

阳：地大震，屋壁皆倾。”

震中烈度为 X 度，工程场地宏观影响烈度达 V 度，见图 1.4.4。

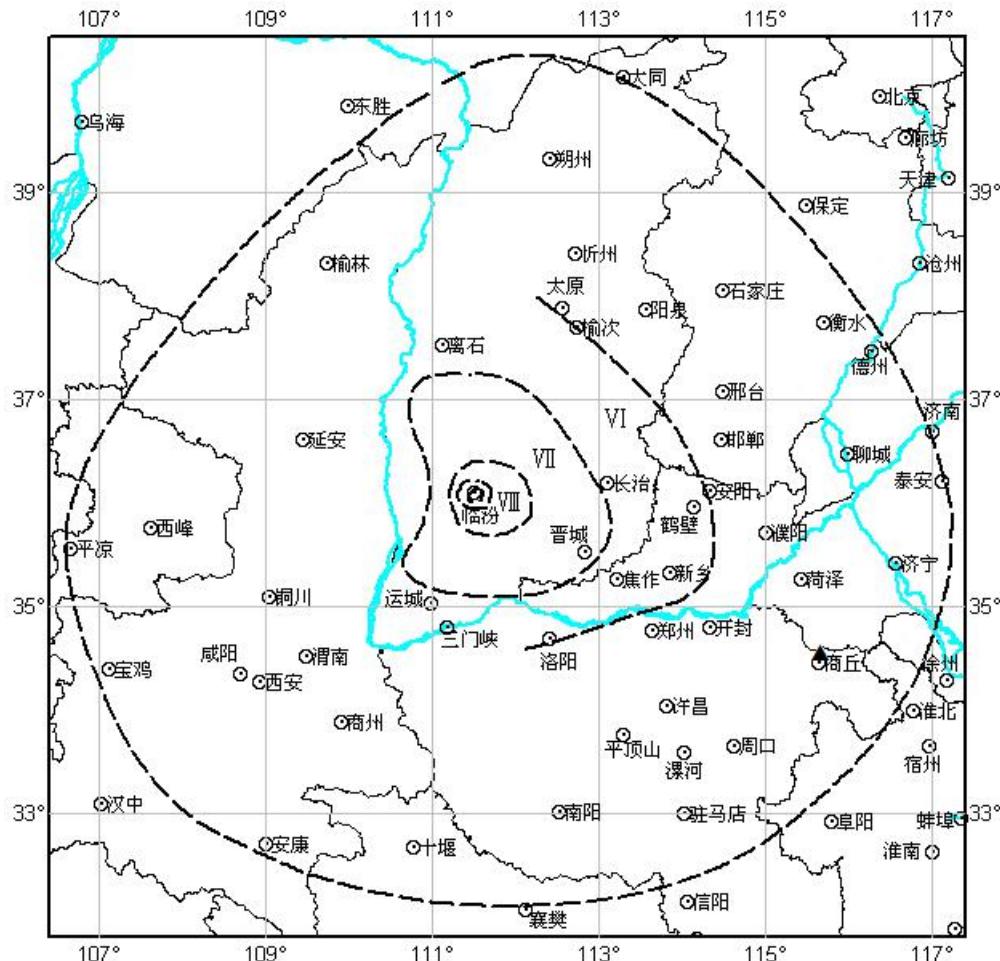


图 1.4.4 1695 年 5 月 18 日山西临汾 $7\frac{3}{4}$ 级地震等震线图

5、1830 年 6 月 12 日河北磁县 $7\frac{1}{2}$ 级地震

据记载：“冀豫之间同时地大震，磁州尤甚，官民房屋倒塌殆尽，人物压毙无算。城关及西乡最重，南乡次之，东北二乡稍轻。山陵分崩，河渠翻凸，桥梁尽折，莹墓皆平，村庄道路不复可辨。章滏两河水尽涸见底，平地坼裂，水涌出，其色黑白不等，水尽继以沙，沙尽继之以寒气。”

“磁县：城垣倾圮过甚，十仅存一二，其存者亦岌岌若将仆。街署、仓监、庙宇、民房倒塌殆尽（或谓倾覆十之七八）。城内及四乡彭城、漳村、路村、南城等 9 村镇之仓库尽皆坍塌。”

“安阳：衙署、民房坍塌过半，间有压伤人口。城郊有地裂。林县：毁坏民房无数，杨家泊南地裂，涌出黑水。汤阴：城垣、衙署、仓库、监狱均有坍塌。南乐：河水溢，房台倾圮无数。内黄：平地崩裂 2 尺许，喷出黑水（记四月）。濮阳、清丰：抚

恤磁、邯郸、肥乡、清丰、南乐、开州(今淄阳)十一州县地震灾民(光绪《开州志》记地大震)。”

“波及冀、豫、鲁、晋、苏、皖诸省广大地区。”

震中烈度为 X 度，工程场地宏观影响烈度达 V 度（图 1.4.5）。

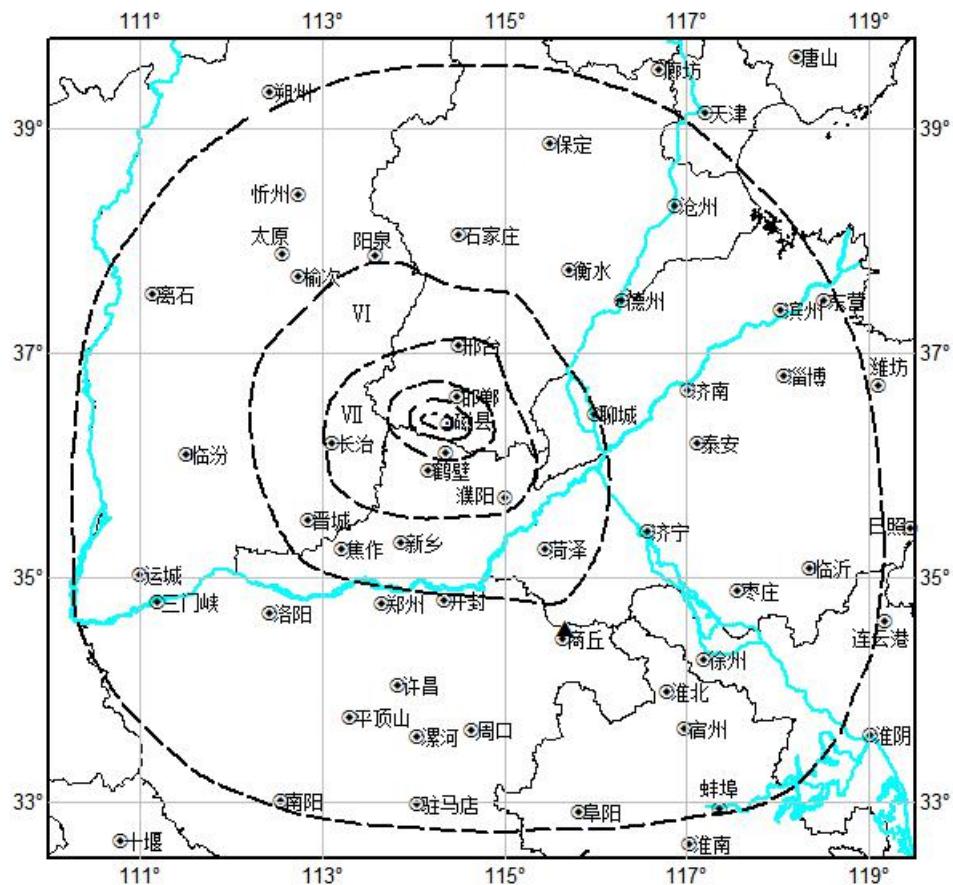
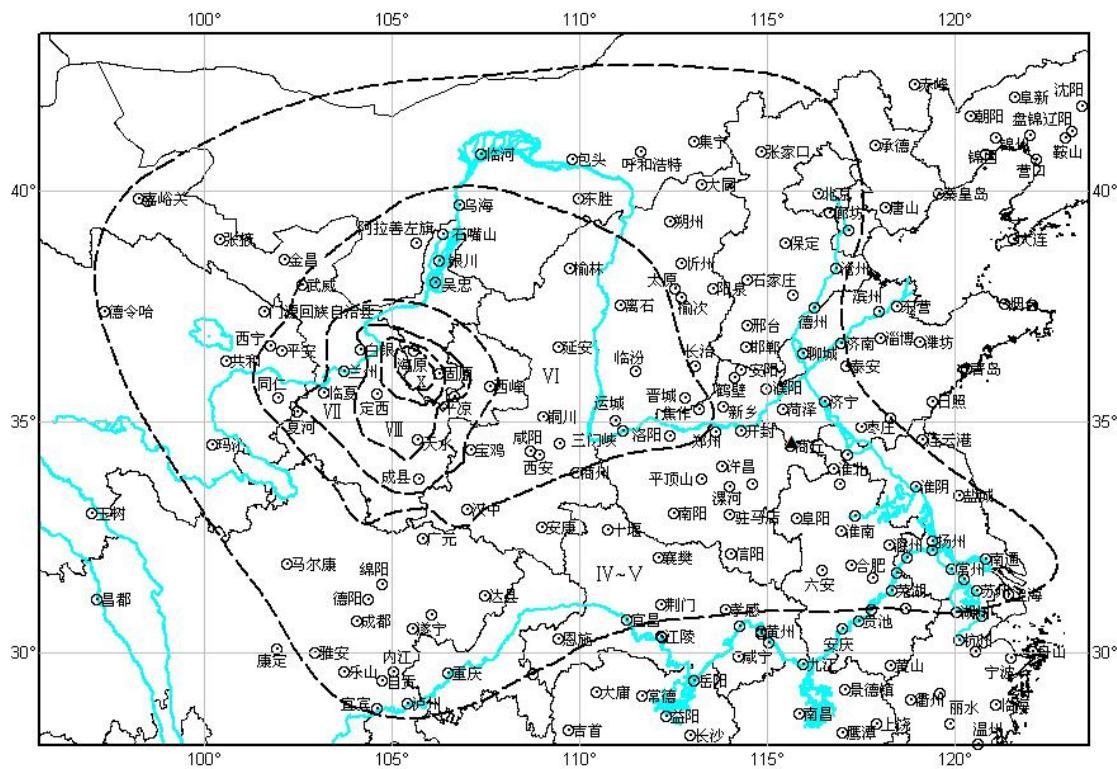


图 1.4.5 1830 年 6 月 12 日河北磁县 $7\frac{1}{2}$ 级地震等震线

6、1920年12月16日宁夏海原8½级地震

本次地震是近百年来在中国大陆人口密集区发生的最大地震，其影响西至玉门，东至东海之滨的上海。据记载“在震中东六盘山地区村镇埋没、地面或成高陵或陷深谷，山崩地裂，黑水横流，海原、固原等四城全毁。只海原一县死 73604 人，死亡 59%。全区因地震而死者不下 20 万人。在地震破坏区，山崩崖塌，山川远移，峰谷互换，城墙倒塌，房屋荡尽，死伤无数。”

震中烈度为ⅩⅢ度，工程场地宏观影响烈度达Ⅴ度(图1.4.6)。

图 1.4.6 1920 年 12 月 16 日宁夏海原 8 $\frac{1}{2}$ 级地震等震线图

7、1937年8月1日山东菏泽7级地震

此次地震影响范围大，北起北京，南至江苏南京、安徽霍山、湖北武汉；西自河南灵宝、山西平陆，东达黄海、渤海沿岸及其海域，陆地有感面积约 65 万平方千米。其中山东的菏泽、东明、定陶、成武、单县，以及当时属河北的长垣县黄河东岸的几个乡（现属菏泽市）震害最为严重。据 1937 年 8 月 28 日当时的报纸报道，仅菏泽县 22 个乡中的 16 个乡的不完全统计，该次地震死亡达 3350 人、受伤 12701 人，牲畜死亡 2719 头，房屋倒塌 320061 间。

震中烈度为 IX 度，工程场地的宏观影响烈度达 VI 度（图 1.4.7）。

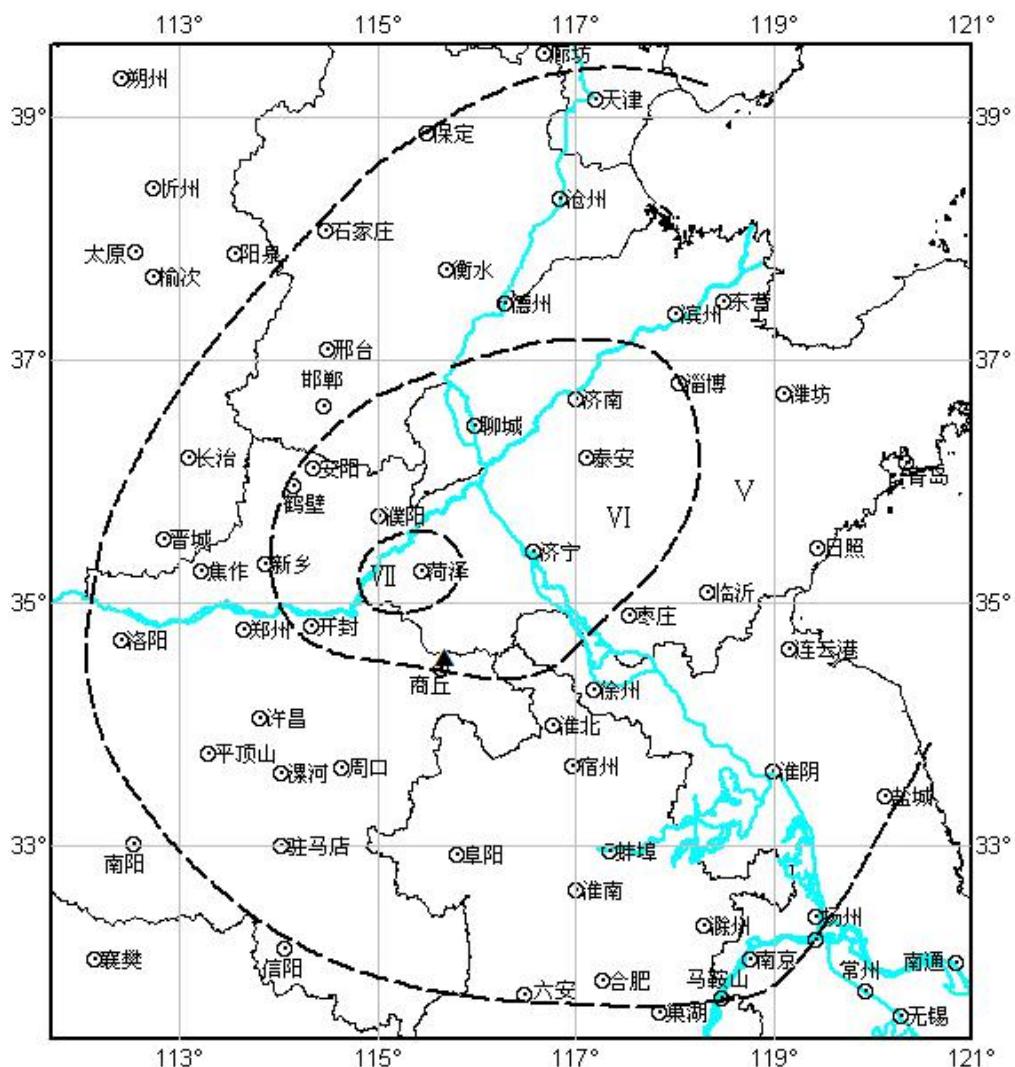


图 1.4.7 1937 年 8 月 1 日山东菏泽 7 级地震等震线

8、1966年3月22日河北宁晋东南7.2级地震

极震区以宁晋县东汪镇为中心，北到尧台，南到史家嘴，西临大曹庄，东到贾家口，其面积约 137 平方公里，在该区冒水、冒沙规模大而普遍，村内外宽大裂缝纵横交错，地裂缝宽达 0.7 米左右，绵延数十米至数公里不等，很多地方裂缝两侧上下错动几十厘米。宁晋县东部及东南部各公社破坏严重，房屋全部或绝大部分倒塌，地裂、喷沙冒水较普遍。城关镇房屋绝大部分倒塌，街道呈一片瓦砾，交通阻塞，几座石碑坊全部倒塌，破坏范围很大。

震中烈度为X度，工程场地宏观烈度达V度（图1.4.8）。

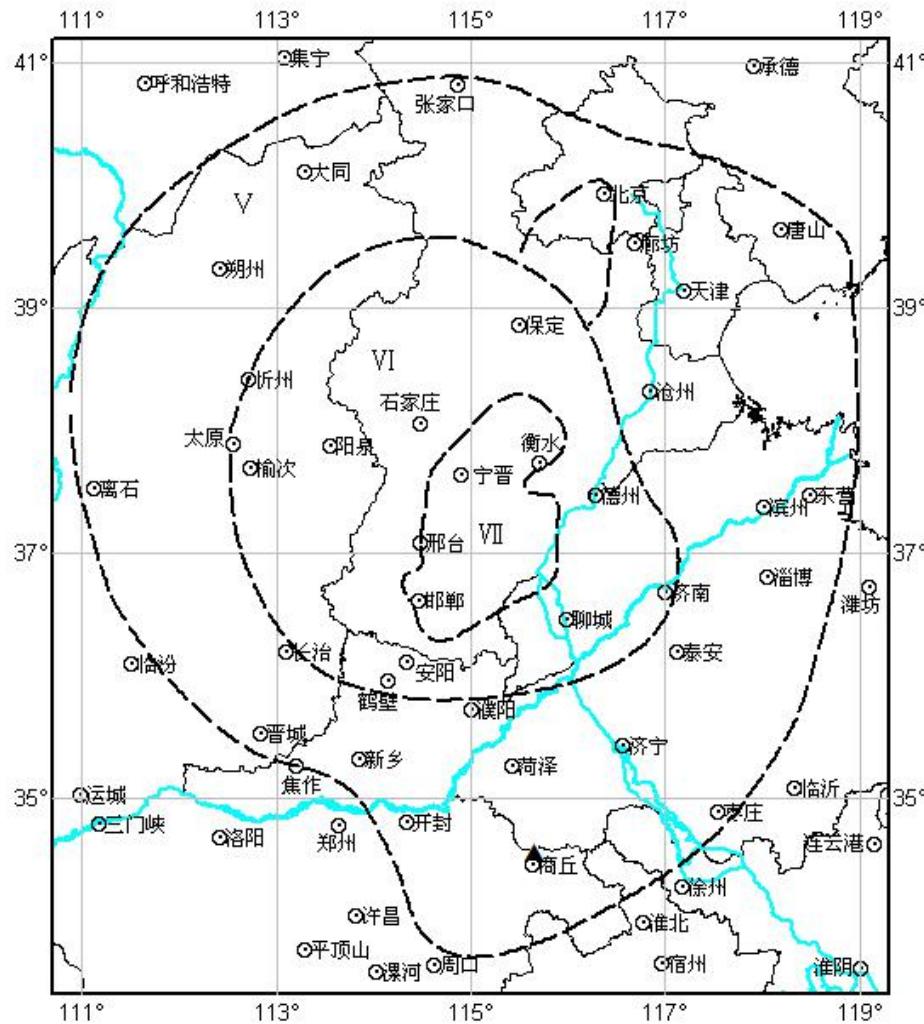


图 1.4.8 1966 年 3 月 22 日河北宁晋东南 7.2 级地震等震线图

1.4.2 影响烈度的统计分析

历史破坏性地震对场地的影响，在史料记载充分的情况下可以直接参考各次地震所造成的宏观影响烈度，当历史资料缺乏时，可以用区域的烈度平均轴衰减关系获得。在本次工作中，场地历史破坏性地震的影响烈度大部分来自史料记载。

计算场地的影响烈度时，采用由中国地震烈度区划图（1990）东部衰减关系折合的平均轴衰减关系： $I=4.493 + 1.454M - 1.792\ln(R+16.0)$

式中 R 为震中距, 单位为 km, M 为震级。

表 1.4.1 中场地影响烈度有等震线资料的以宏观影响烈度为准，无等震线资料的以计算烈度为准。历史破坏性地震对场地的最大影响烈度为Ⅶ度。图 1.4.9 为区域范围内破坏性地震综合等震线分布图，场地位于Ⅶ度区。

表 1.4.1 历史破坏性地震对工程场地影响烈度

编号	地震日期	震中位置	震级	震中	震中距	影响烈度
----	------	------	----	----	-----	------

	(年.月.日)	北纬 (°)	东经 (°)	地名	(M)	烈度	(km)	计算烈度	宏观烈度	综合影响烈度
1	462.08.17	34.8	117.0	山东兗州南	6 $\frac{1}{2}$	VIII	126	5.1		V
2	1303.09.25	36.3	111.7	山西赵城、洪洞	8	XI	406		V	V
3	1502.10.27	35.7	115.3	河南濮城	6 $\frac{1}{2}$	VIII	130	5.0		V
4	1556.02.02	34.5	109.7	陕西华县	8 $\frac{1}{4}$	XI	545		V	V
5	1668.07.25	34.8	118.5	山东鄆城	8 $\frac{1}{2}$	\geq XI	262		VII	VII
6	1695.05.18	36.0	111.5	山西临汾	7 $\frac{3}{4}$	X	409		V	V
7	1830.06.12	36.4	114.3	河北磁县	7 $\frac{1}{2}$	X	237		V	V
8	1920.12.16	36.5	105.7	宁夏海原	8 $\frac{1}{2}$	XII	924		V	V
9	1937.08.01	35.2	115.3	山东菏泽	7	IX	77		VI	VI
10	1937.08.01	35.3	115.4	山东菏泽	6 $\frac{3}{4}$	VIII	85	6.0		VI
11	1983.11.07	35.28	115.28	山东菏泽	6.0	VII+	86	4.9		V
12	1966.03.22	37.53	115.05	河北宁晋	7.2	X	334		V	V

1.5 区域现代构造应力场特征

现代构造应力场是驱动地壳断裂构造活动并孕育发生地震的基本原因，不同方向的断裂活动的性质及其发生地震的震源力学特性，反映了区域构造应力场的特征，因此，根据地震的震源机制解反推地震发生地区的现代构造应力场，是目前常用的有效方法。

根据谢智、刘尧兴等对河南及邻区地震的震源机制解资料分区计算结果（2002），冀鲁豫交界平均P轴走向为76°。

本项目收集到的区域内地震的震源机制解资料见表1.5.1，区域内地震断层多为走滑型断层类型。

在一定区域内，用较多地震的主压应力方向求得的平均值，代表了该区的现代构造应力场的方向。图1.5.2是区域震源应力场P、T轴的方位角与仰角分布图。从图中可以看出，P轴优势方位为北东东向，T轴优势方位为北北西向，说明区域主要处于以北东东走向的水平压应力和北北西走向的水平张应力为特征的构造应力场作用之下。

P、T轴的仰角大多数小于40°，说明区域构造应力场的方向主要为近水平向。

表 1.5.1 区域地震震源机制解参数

编 号	地震日期 年月日	地名	震中位置		震级 MS	深度 (km)	节面 A			节面 B			P 轴		T 轴	
			北纬 (°)	东经 (°)			走 向	倾 向	倾 角	走 向	倾 向	倾 角	方 位	仰 角	方 位	仰 角
1	1970.08.10	山东曲阜	35.70	116.88	4.6	12	238	-137	88	146	-6	44	291	30	183	27
2	1973.09.22	安徽淮北	33.58	116.52	4.0	10	263	-26	83	357	-175	65	37	23	133	12
3	1974.02.19	山东菏泽	35.40	115.40	3.1	21	91	35	85	358	176	56	39	20	140	27
4	1977.07.09	山东成武	34.87	115.80	4.1	25	145	-26	80	240	-168	64	280	26	15	11
5	1978.06.05	河南新乡	35.35	113.92	4.5	22	5	-42	80	104	-168	49	135	36	241	20

6	1978.10.01	河南鹤壁	35.83	114.18	3.9	23	147	69	56	2	119	40	72	8	189	70
7	1979.01.02	河南淇县	35.68	113.95	3.2	20	203	-160	75	108	-17	70	246	25	155	3
8	1980.08.02	河南林州	35.95	113.87	4.7	20	27	139	88	119	5	48	261	26	155	30
9	1981.12.23	山东菏泽	35.42	115.30	4.1	16	211	140	61	320	29	60	88	1	350	44
10	1982.07.28	山东东明	34.98	115.07	3.5	19	305	50	73	198	165	47	243	16	357	43
11	1983.11.07	山东菏泽	35.28	115.28	6.0	12	114	-42	70	222	-153	50	251	44	352	12
12	1995.08.23	河南清丰	35.90	115.03	2.9	17	188	NW	45	282	NE	85	226	25	155	34
13	1998.12.09	河南滑县	35.28	114.37	2.6	14	266	-63	60	41	-128	40	44	64	157	11
14	1999.05.20	河南范县	35.78	114.97	3.5	24	191	-132	77	88	-11	47	243	40	131	19
15	1999.06.22	河南中牟	34.87	113.97	3.2	22	138	40	80	40	167	51	83	19	187	35
16	1999.12.30	安徽利辛	33.32	116.07	4.1	13	242	-138	61	128	-38	54	278	50	184	4
17	2005.04.27	河南范县	35.63	115.38	3.8	13	196	NW	46	319	NE	54	81	5	181	64
18	2008.03.10	河南封丘	34.93	114.72	4.4	15	221	WN	88	312	EN	87	86	1	356	4
19	2010.10.24	河南太康	34.07	114.65	4.7	8	234	SE	85	325	SW	83	100	1	9	8

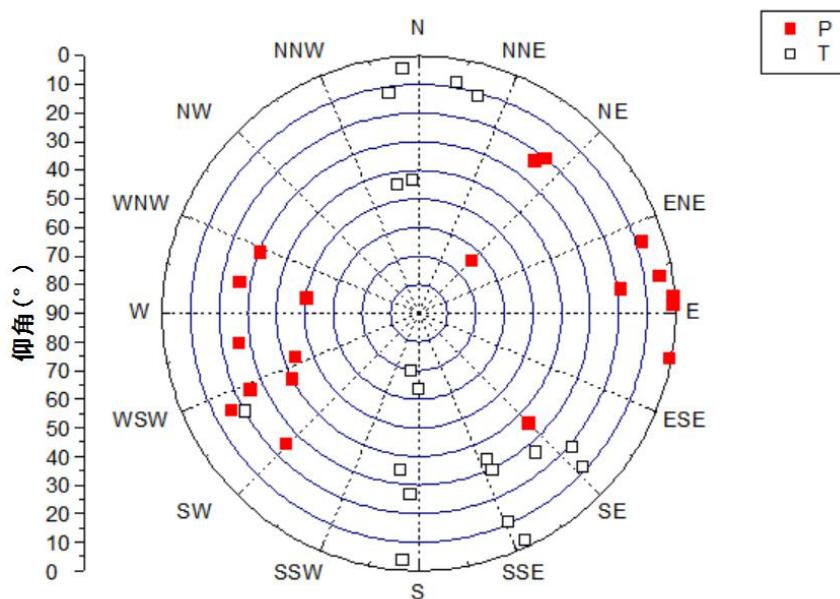


图 1.5.2 P、T 轴方位角与仰角分布图

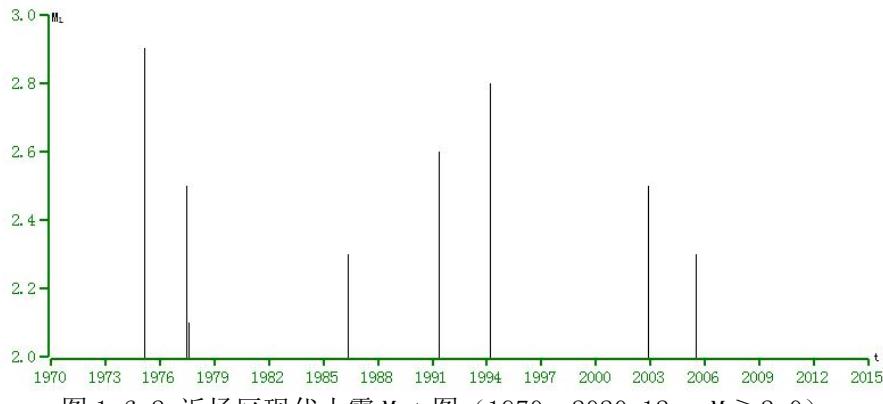
1.6 近场区地震活动性

近场区内没有破坏性地震的历史资料记载。从现代地震记录来看，自 1970 年至 2020 年 12 月共记录到 $M_L \geq 2.0$ 级地震 16 次，最大地震为 2003 年 5 月 4 日睢县南 $M_L 3.4$ 级地震（表 1.6.1）。

近场区现代小震活动较弱，在空间分布上比较分散，地震主要分布在近场区东北部。图 1.6.2 为现代地震时序图。

表 1.6.1 近场小震目录(1970~2020. 12, $M_L \geq 2.0$)

编号	地震日期	北纬(°)	东经(°)	震级(M_L)
1	1972.7.15	34.33	115.22	2.6
2	1978.1.25	34.23	115.18	2.4
3	1982.6.29	34.32	115	2.5
4	1982.6.29	34.25	115.08	2.7
5	1984.4.4	34.43	114.75	2.2
6	1994.3.25	34.33	115.37	2.8
7	1997.2.11	34.43	115.3	2.9
8	1997.10.7	34.48	115.12	3
9	2002.3.2	34.42	115.08	2.5
10	2002.4.19	34.42	115.15	2.5
11	2002.8.11	34.55	114.77	2.4
12	2003.5.1	34.38	115.05	3.4
13	2003.5.4	34.38	115.22	2.3
14	2004.11.2	34.28	114.9	2.8
15	2019.3.21	34.22	115.04	3.2
16	2019.4.1	34.22	115.04	2.1

图 1.6.2 近场区现代小震 M-t 图 (1970~2020. 12, $M_L \geq 2.0$)

总体上看，近场区现代地震活动具有频率低、强度小的特点，地震分布较为分散，地震活动水平较低；近场区历史上没有记录到破坏性地震。综合现代及历史地震活动性分析认为，近场区发生中强以上地震的可能性不大。

1.7 地震活动环境评价

通过本章的论述，可以对地震环境作出如下评价：

(1) 区域历史上记载最早的破坏性地震为公元 294 年河南襄城东 $5\frac{1}{2}$ 级地震，从公 294 年到 2020 年 12 月，区域内记载到 $M \geq 4.7$ 级地震 40 次。1970 年以来，区域内共记录 $M_L \geq 3.0$ 级地震 189 次。

(2) 区域破坏性地震在空间分布上呈现出不均匀性，地震活动北强南弱，范县-菏泽一带地震活动水平较高。区域现代地震活动在空间分布上呈现出不均匀性，地震活动仍是北强南弱，范县-菏泽一带地震丛集特征明显，呈团簇状分布。

据 1970 年以后的仪器记录资料，区域地震的震源深度主要分布在 6~20km 范围内，区域内的地震基本是发生在地壳中上层的浅源构造地震。

(3) 区域涉及华北平原地震带、郯庐地震带。华北平原地震带未来百年地震活动趋势应以平均活动水平来估计；郯庐地震带未来可能进入下一活跃期前的应变加速释放阶段，会有中、强地震活动。

(4) 区域内在历史上曾多次遭受过破坏性地震的影响，工程场地历史地震最大影响烈度达 VII 度。

(5) 根据区域震源机制解资料，区域主要处于以北东东走向的水平压应力和北北西走向的水平张应力为特征的构造应力场作用之下。

(6) 近场区内没有破坏性地震的历史资料记载。1970 年至 2020 年 12 月共记录到 $M_L \geq 2.0$ 级地震 16 次，最大地震为 $M_L 3.4$ 级。近场区现代地震活动具有频率低、强度小的特点，地震分布较为分散，地震活动水平较低。综合现代及历史地震活动性分析认为，近场区发生中强以上地震的可能性不大。

2 区域地震地质环境

区域指以工程场地为中心，半径不小于 150km 的范围。该区大部分为第四系覆盖，给认识区域地震地质环境带来了一定的困难，在该区域前人在第四系研究和物探钻探方面有较好的工作基础，为此创造了分析地震构造的有利条件。本章以大地构造、地球物理场、新构造运动、断裂活动、现代地壳形变和现代构造应力场等方面的研究为基础，综合讨论区域内地震发生的地质环境。

2.1 区域大地构造概述

以本工程场地为中心的区域，涉及了 1 个一级大地构造单元，即华北准地台（I）（图 2.1.1）。现将该大地构造单元的基本特征简述如下。

2.1.1 华北准地台（I）

华北准地台西邻天山—兴蒙褶皱带和西北准地台，南接秦祁褶皱系，是我国大陆内形成时代最古老的陆块。准地台的褶皱基底由太古界和早元古界的中深变质岩系组成，早元古代末吕梁运动使上述基底岩系全面褶皱回返、断裂，形成准地台的结晶基底，构造线方向以北东和近东西向为主。自中元古代后，准地台进入了一个比较稳定的构造环境。中生代时期，准地台的活动以断块差异运动为特征，沿准地台边界断裂或次级块体间的边界断裂发生强烈升降差异运动，形成了由中生界组成、规模和活动强度不一的深凹陷或断陷盆地，断裂活动性以正断为主兼有水平扭动。新生代乃至现今，总体上准地台活动依然强烈，是强烈地震多发区。但各区差异较大，工程场地所在地区是活动强度相对较弱的地区。

根据准地台各块体间的活动差异，可进一步划分成 2 个二级构造单元（表 2.1.1）由东往西为：鲁西台背斜、黄淮海凹陷。本工程场地位于其中的黄淮海凹陷（I₂）区的南部。该区地表广为第四系覆盖，仅在西部边缘地带有基岩出露。早期黄淮海凹陷与相邻块体原为统一整体，自燕山运动后西部隆起，本区下沉形成凹陷（李国鹏，1973）。由于基底断裂作用，凹陷呈不均衡下沉，形成一系列次级凹陷和凸起。

图 2.1.1 大地构造分区图

新乡-商丘断裂以南地区，由于近东西向基底断裂的影响，形成多个呈北西或东西

向的凸起和凹陷，凸起上缺失侏罗-古近系，凹陷内堆积中生代-古近纪陆相地层和火山碎屑岩。古近纪陆屑建造厚达 5000m，以后又堆积 500~1000m 的新近系和第四系陆屑建造，形成今日之黄淮海凹陷（河南省地质矿产局，1989）。其次级构造块体有：济源-开封凹陷、通许凸起、周口凹陷、西平-平舆凸起等。新乡-商丘断裂以北地区，在太行山东麓断裂带和聊城-兰考断裂带控制下继续形成北东走向断陷，在北东向断裂控制下，形成两凹一凸的次级块体，由西往东为：汤阴凹陷、内黄凸起，东明凹陷。本工程场地位于济源-开封凹陷的东南部。本区域仅涉及黄淮海凹陷和鲁西台背斜两个二级构造区。

表 2.1.1 区域大地构造单元划分一览表

一级构造单元名称	基底形成时代	盖层形成时代	构造线方向	二级构造单元名称
华北准地台（I）	太古代、早元古代	元古、古、中生代	北东、东西	鲁西台背斜（I ₁ ） 黄淮海凹陷（I ₂ ）

2.2 地球物理场和深部构造及其与地震的关系

2.2.1 布格重力异常

布格重力异常是地下不同密度界面的综合重力效应。图 2.2.1 是以本工程场地为中心的区域布格重力异常图（地质矿产部航空物探遥感中心，1979）。由图可见，区域内异常值变化于 $(10 \sim -35) \times 10^{-5} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ 之间，大部位于负异常区内。由西向东异常值基本上呈逐渐增大的趋势，西部异常值多位于 $(0 \sim -35) \times 10^{-5} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ 之间，东部异常值多位于 $(0 \sim 10) \times 10^{-5} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ 之间。

物探资料证实，重力高和重力低与下古生界到前下古生界的侵蚀面起伏相关，其中重力高反映深部构造隆起，重力低反映深部构造凹陷。太行山大型重力梯级带东部的重力低与该区地壳凹陷相对应、东部的重力高则与该区地壳隆起相对应。局部的西北或东西向重力梯级带则与本区次级块体的隆起与下沉相关。如开封重力低、淮北重力高即与该区的深部地壳的隆、凹相关，前者为地壳隆起区，后者为地壳下沉区。

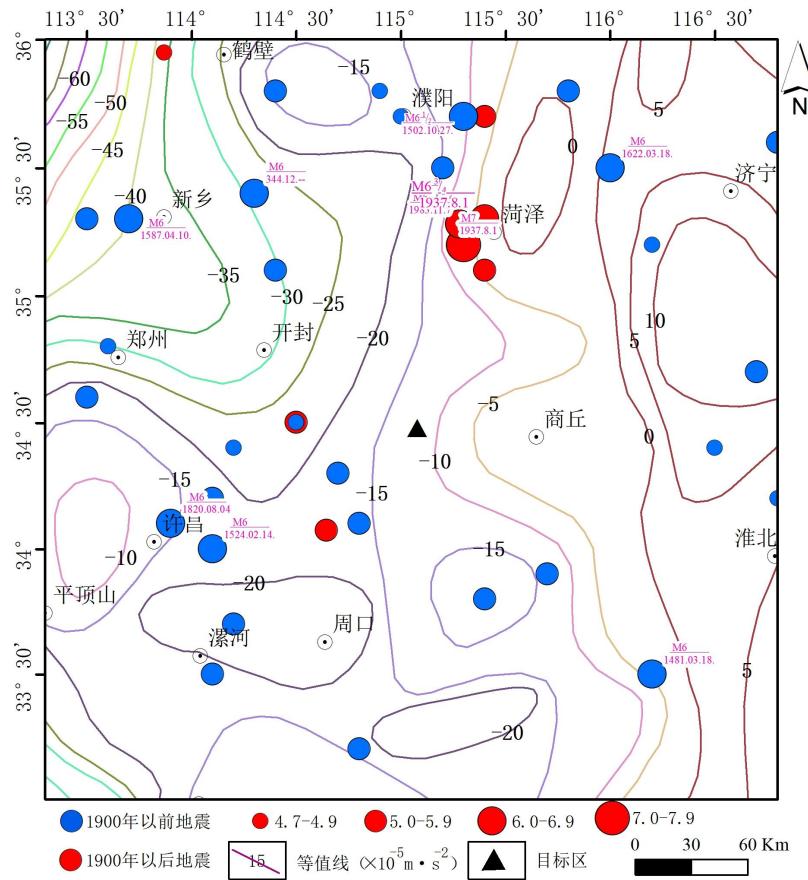


图 2.2.1 区域布格重力异常图

聊城-兰考重力梯级带，走向北北东，其位置与聊城-兰考断裂相一致，显示了该深断裂的活动迹象。本场地位于聊城-兰考重力梯级带的东部，其布格重力变化平缓。

目标区布格重力异常值位于 $(-10 \sim -15) \times 10^{-5} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ 之间。

2. 2. 2 航磁异常

ΔTa 航磁异常是地质构造磁性变化的综合表示，引起磁异常的磁性体包括各种性质和各个时代的地质体，磁场的差异表现在磁异常的符号、强度、梯度、异常形态和走向等方面。

本区位于豫、皖和鲁磁异常区范围内，这一大区域的磁场特征是以面积宽阔的正磁异常为背景，在此背景上叠加了走向各异的局部强磁正异常和平缓的负异常。根据磁异常的差别，研究区又可划分为多个正、负磁异常区，如单县-砀山正磁异常区、鹿邑-郸城负磁异常区、徐州-阜阳-合肥正负交替异常区等。

从图 2.2.2 中还看出，永城地区处于平静的正常场背景区，无明显磁性差异的地质构造体或磁性地质体，应属于深部构造活动较弱的地区。沿聊城-兰考一线出现的磁异常带，与重力异常带十分吻合，反演结果为一条切壳的深断裂，控制了沿带的地震活

动。目标区航磁异常值为 100nT。

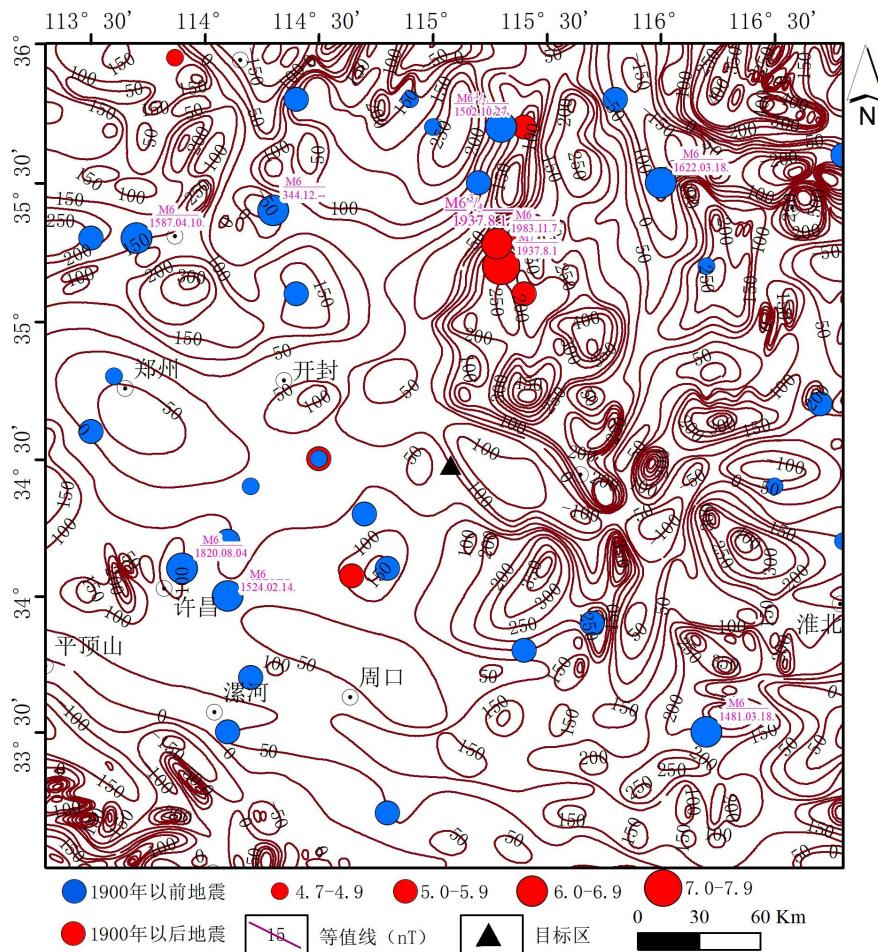


图 2.2.2 区域航磁 Δ Ta 异常图

2. 2. 3 地壳结构特征

由区域及邻区地壳厚度（莫霍界面深度）图，可以看出地壳厚度具有由中部向东西两侧逐渐加厚的趋势（图 2.2.3）。中部厚度为小于 30km 左右，东西部厚度为 30~32km 左右。商丘市附近地壳厚度在 30km 左右。徐州、永城、商丘、菏泽、开封地壳厚度有着明显的阶梯状变化，这些梯度带中的某些地段是强震的发生带，如菏泽 7 级地震即发生在聊城-兰考地壳厚度梯度带上。

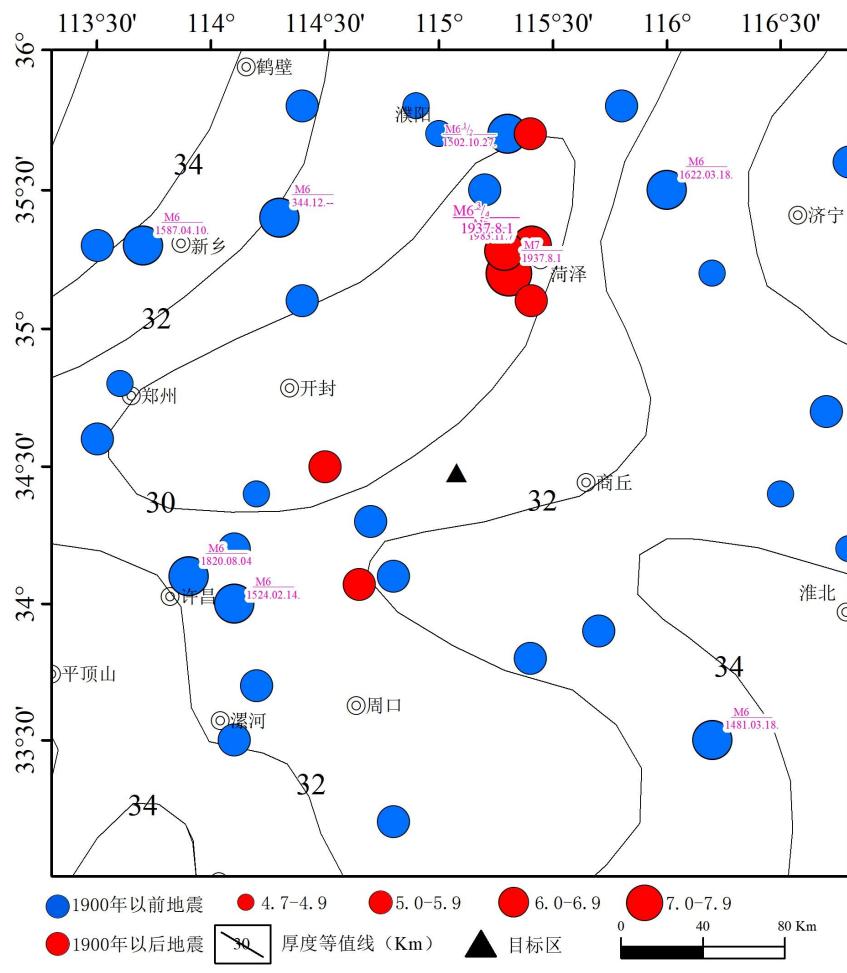


图 2.2.3 区域莫霍面深度图

2.2.4 地球物理场与地震活动的关系

区域地震的发生与重力梯度带、航磁异常带，地壳结构速度梯度带和上地幔变异带等有密切的关系。如菏泽 7 级地震与聊城-兰考重力梯度带和航磁异常带分布相关。

2.3 区域新构造特征及其与地震活动的关系

2.3.1 新构造运动概述

区域新构造运动以大面积升降作用为主要特征，并伴有老断裂的新活动，在断裂控制下，形成了不同规模的隆起和凹陷。此外，水平运动也有显示。

大面积抬升作用表现为西部山区的隆起和东部平原的下沉。西部山区地貌形态上表现为多级夷平面与河流阶地的形成，东部平原地带的下沉表现为巨厚的新生代堆积物的形成。东部下沉区在总体下沉基础上由于断裂作用又形成不同沉降幅度的凸起与凹陷。伴随断裂活动还有玄武岩浆的喷发，如沿太行山东麓，北起鹤壁的鹿楼南至前营、黑山、杨小屯到浮山、大赉店、庙沟、北四井等地，均有玄武岩分布，构成一北

东向的橄榄玄武岩带（赵景珍等，1991）。

本区除垂直差异运动外，水平运动形迹也有显示，如汤西断裂具右旋走滑运动分量。

2.3.2 新构造单元的划分

根据区域及邻区新构造垂直差异运动的不同，区域内划分出3个一级新构造单元（附图一）：山西隆起（I）、北华北凹陷（II）、南华北凹陷（III）。根据其间新构造活动的差异又可细分出11个二级构造单元。新构造单元的划分见表2.3.1、附图一。

表2.3.1 区域新构造单元划分一览表

一级新构造单元	二级新构造单元
山西隆起（I）	太行山凸起（I ₁ ）
北华北坳陷（II）	汤阴地堑（II ₁ ）内黄隆起（II ₂ ）东明凹陷（II ₃ ）鲁西斜坡带（II ₄ ）
南华北坳陷（III）	济源-开封凹陷（III ₁ ）太康隆起（III ₂ ）周口凹陷（III ₃ ） 蚌埠隆起（III ₄ ）西平-平舆隆起（III ₅ ）驻马店-淮滨凹陷（III ₆ ）

2.3.3 新构造单元特征

2.3.3.1 山西隆起（I）

1) 太行山凸起（I₁）

位于区域中部，西与山西断陷带相邻，东以太行山山前断裂带和华北平原沉降区为邻。新生代整体掀斜式隆升，隆起幅度自东向西逐渐增大，西侧北台期夷平面海拔1800m左右，向东降至1000m，而唐县期夷平面由西部的1400m降至东侧的200m。断块隆起区内部差异活动不甚明显，地震活动较弱，破坏性地震主要沿东西两侧的边界断裂带分布，但太行山隆起区内部长治断裂带中南段历史上也曾发生过。

2.3.3.2 北华北凹陷（II）

位于区域东北部，分布在新乡-商丘断裂带以北地区，全区被第四系覆盖。自燕山晚期以来凹陷开始下沉，其中堆积500~2500m厚的新近系和第四系。由于基底断裂活动影响的差异，下沉呈不均衡状，使其形成次一级凹陷和凸起。构造线以北北东向为主，伴有北西西向断裂活动。根据构造差异运动，又可细分出6个二级新构造单元。

1) 汤阴地堑（II₁）

地堑基底为二叠系，上覆古近系、新近系和第四系，最大厚度3000m以上，四周被第四纪断裂围限，形成长条形北北东向地堑，地堑南深北浅，向东微倾，表现为强烈的掀斜运动。

2) 内黄凸起 (II₂)

凸起基底为太古界、古生界。隆起时期为中生代。新近系、第四系不整合于其上，沉积厚度较小约500~2500m，西北薄、东南厚，凸起向东南倾斜。第四纪块体西升东降，具掀斜运动性质。四周被断裂围限，形成北东走向的条形块体。

3) 东明凹陷 (II₃)

凹陷基底为古生界，其上有中生界覆盖。上覆新生代地层厚达7000~9000m（河南省地矿局，1989），为新生代强烈下沉的断陷盆地。第四纪强烈下沉，南、北两头幅度最大，长垣以南深达400m。凹陷走向北北东，四周断裂发育，主要为高角度正断层，其次为北西西向的平移断层。其活动主要受聊城-兰考断裂控制。

4) 鲁西斜坡带 (II₄)

位于区域东北部，为鲁西隆起的西坡边缘带，其深部由结晶基底组成，上覆古生代盖层，新近纪以来开始下沉，堆积200~1000m厚的新近系和第四系。斜坡带西侧边缘近断裂处第四纪厚达300m，其厚度由东向西增厚，形成向东倾斜的斜坡带。

2.3.3.3 南华北凹陷 (III)

分布于新乡-商丘断裂带以南广大地区，是中新生代强烈下陷的地区。由于凹陷内部北西向、近东西向断裂的活动，形成多个次级凸起和凹陷，其构造走向也为东西或北西西向。其间堆积中生代中晚期陆相碎屑岩和火山碎屑岩，古近纪陆相地层厚达5000m以上。其后继承性下沉，堆积了厚约500~1000m的新近系和第四系，并形成今日之南华北平原。根据构造差异活动，可分为6个二级新构造单元。

1) 济源-开封凹陷 (III₁)

四周被第四纪断裂围限，北为新乡-商丘断裂，西为李迈-武陟断裂和老鸦陈断裂，南为上街-中牟断裂。凹陷总体走向北西西，是新生代强烈下陷的断陷盆地。新近系和第四系沉积厚度达2400~3000m。沉降中心在原阳附近。凹陷西北深东南浅，具掀斜运动性质。第四纪继承性下沉、沉降中心在开封地区，最大厚度达400m左右。向西北厚度逐渐减薄，形成东南厚西北薄的掀斜块体。

2) 太康隆起 (III₂)

其总体走向呈近东西。基底主要为太古界和古生界，其上有新近系河湖相陆屑堆

积，南、北两侧厚度大，达1300m左右，中间仅为400m左右。第四系厚达100~200m。南北两侧受断裂控制，凸起内发育北西和北东向两组断裂。

3) 周口凹陷 (III₃)

位于区域东部的周口凹陷，其基底为古生界、三叠系、局部为太古界。凹陷内主要沉积古近纪河湖相碎屑层。新近纪、第四纪继承性下沉，也为河湖相堆积物。新生代沉积最大厚度达7000m以上（河南省地矿局，1989）。凹陷东部第四系厚达260m，向西逐渐变薄，仅为40~60m，具掀斜运动性质。凹陷内断裂发育，主要有北西西、北东向两组，对凹陷的形成起重要作用。

4) 蚌埠隆起 (III₄)

位于五河至蚌埠一带，由基底岩系构成，五河群出露较为广泛，凤阳组仅限于南缘。在经历了晚太古代优地槽阶段和早远古代冒地槽阶段后，本区基底固结。晚侏罗世由于刘府深断裂的活动，沿断裂形成一些串珠状火山岩盆地。第三纪以来，由于东西向怀远断裂的强烈活动，使隆起区北部大规模陷落而成槽地，堆积了近千米厚的红色岩系。蚌埠期的混合花岗岩呈小岩株群沿复背斜轴部分布，另有少量燕山中期闪长岩和燕山晚期正长岩分布。

5) 西平 - 平舆隆起 (III₅)

位于周口坳陷以南，隆起之上广泛沉积了新近系湖相杂色粘土岩、砂岩夹煤线组成的次稳定型复陆屑建造，第四系为河湖相粘土、砂、砂砾等碎屑物。此外，在北部边缘地带尚发育有古近系。新生界最大厚度约1500m，西薄东厚。断裂以北西或北西西向为主，次为北东或北北东向。地震活动水平较弱，以中小地震活动为主。

6) 驻马店-淮滨凹陷 (III₆)

位于西平-平舆隆起以南，华北断块南缘断裂以北。凹陷内新近系为河湖相杂色砾岩、砂砾岩、砂岩、粘土岩等组成的复陆屑建造，北薄南厚，厚度约300~900m。第四系为河湖相粘土、砂、砂砾石层，厚度一般在100~200m。断裂以北西或北西西向为主，次为北东或北北东向。

2. 3. 4 新构造运动与地震的关系

区域新构造运动与地震活动的关系主要表现在如下几点：

1) 一级新构造分区界线是地震发生的主要场所。如一级构造单元界线太行山东麓边界带和新乡-商丘边界带是历史上多次地震的发生带。修武6级地震和封丘5 $\frac{1}{2}$ 级地

震等即发生在这些边界带上。

2) 二级新构造分区界线也是地震发生的重要地带, 如菏泽 7 级地震即发生于东明凹陷与鲁西斜坡带的边界带上。又如汤阴 5 级地震即发生在汤阴地堑与内黄凸起的边界带上。

3) 垂直差异运动强烈的地带是地震发生的地带。如开封凹陷与内黄凸起之间是垂直差异运动十分强烈的地带, 其新近纪以来的差异幅度达 1000 余米, 在该带上曾发生过卫辉 6 级地震和封丘 $5\frac{1}{2}$ 级地震。

4) 凹陷内下沉最强烈的部位是地震发生的位置。

5) 在凸起上局部下沉的部位是地震容易发生地震的地区, 如太康凸起南侧和北侧属于隆起区的局部下沉部位, 历史上即发生过许昌 6 级地震。

2. 4 区域主要断裂活动特征及其与地震活动的关系

2. 4. 1 区域主要断裂活动概述

区域内第四纪断裂的分布见区域地震构造图(附图 1)。该图以工程场地中心, 以大于等于 150km 为半径所覆盖的地区。该范围内涉及的断裂很多, 晚更新世及其以后活动的断裂为本区的主要发震断裂, 为此我们如数地将这类断裂编入图中, 并在报告中作重点论述。另外, 本区还分布一些中强地震, 它们的活动在空间上与很多早、中更新世断裂相关, 对这类断裂也编入了图中。

根据前人的资料(河南省地震局, 1989), 区域内第四纪断裂主要有三组: 北北东向、北西向和近东西向, 它们显示了本区活动断裂的总体面貌, 它们是与本区地震相关的断裂构造。本节将重点讨论这些断裂的活动性、活动时代及其与地震的关系。

2. 4. 2 断裂活动性分述

区域内主要活动断裂基本特征列于表 2.4.1 中。本节将按表 2.4.1 给出的 14 条主要活动断裂进行论述。

表 2.4.1 区域主要断裂活动特征一览表

序号	断层名称	产 状			最新活动时代	最新活动性质
		走向	倾向	倾角		
1	汤西断裂	30°	SE		晚更新世	正断
2	汤东断裂	30°	NW	陡倾角	晚更新世	正断
3	长垣断裂	NNE	SE	50°	早更新世	正断
4	黄河断裂	NNE	NW	40°—70°	早更新世	正断
5	聊城-兰考断裂	20°~30°	NW	50°~70°	晚更新世—全新世	正断

					早期	
6	曹县断裂	NNE	E/SE		早、中更新世	正断
7	巨野断裂	NNE	W/NW	陡	早、中更新世	正断
8	嘉祥断裂	SN	N	75~80°	早、中更新世	正断
9	郓城断裂	近 EW	N	50° -70°	晚更新世	正断
10	新乡-商丘断裂	EW	N	60~70°	早、中更新世	正断
11	许昌-太康断裂	EW	S		早、中更新世	正断
12	鲁山-漯河-太和断裂	NWW	N		早、中更新世	正断
13	夏邑-太和断裂	NNE	NWW	陡	早、中更新世	正断
14	永城-固始断裂	NNE	NWW	70°	早、中更新世	正断

1) 汤西断裂

汤西断裂南起新乡市西侧，向北延伸经青羊口，北至汤阴宜沟附近，全长 90km。走向 30°，倾向南东。该断裂南段古近纪时期活动强烈，汲县次凹靠下降盘一侧古近系厚度 3600m，上升盘一侧仅有零星分布。新近纪时期也有过强烈活动，断裂西侧（上升盘）出露太古界及古生界以及少量的新近系，东侧（下降盘）新近系-第四系厚度可达千米以上（其中第四系较薄仅 30 m）。青羊口附近新 33 孔孔深 896.14m，卫辉岱村附近陈 16 孔孔深 991.20m 均未穿透新近系，新近系底板落差可达 1000m，可见该断裂在新近纪有强烈活动。上新统鹤壁组砾岩层顶面落差幅度由北向南加大，在淇县沕河出口处为 25m，到新乡市北潞王坟组泥灰岩落差 70m。该断裂也明显地显示出水平运动迹象，汲县西岱村十里桥南可直接见到鹤壁组砾岩被错断的现象，该处据探槽揭露（图 2.4.1），中更新世晚期或晚更新世早期的棕黄色粘土与鹤壁组砾岩呈断层接触，断面平滑，可见到向南西方向的斜向擦痕，反映出该断裂东盘沿断层面作斜向滑动的右旋正断层（河南省地震局，1989），据被断错地层分析为晚更新世活动断裂。据刘尧兴等（2001）研究，最新一期活动可能发生在晚更新世末或全新世早期。

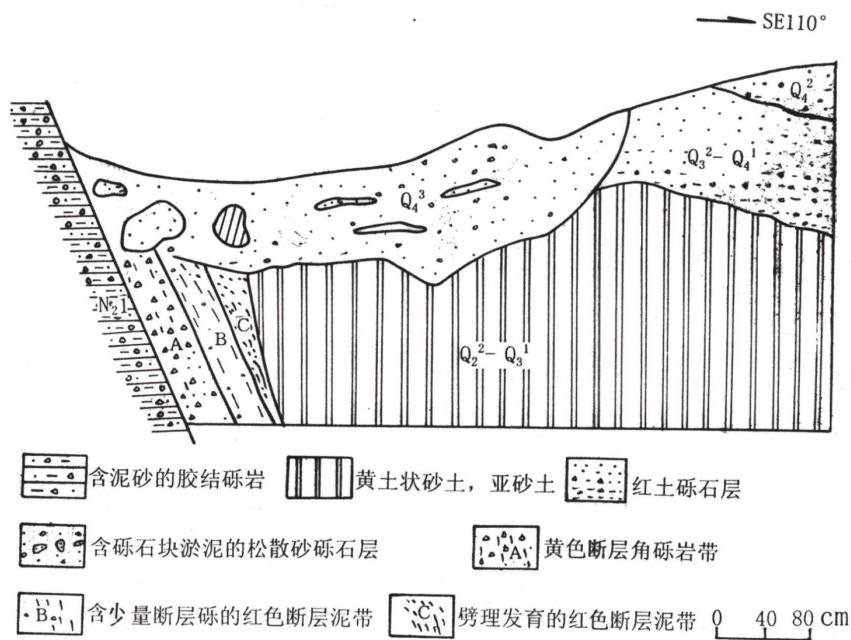


图 2.4.1 大谷驼探槽 (河南省地震局, 1989)

2) 汤东断裂

该断裂长约 100km。走向 30°，倾向北西，陡倾角，正断为主。它位于汤阴地堑东侧，隐伏于第四纪冲洪积物之下。断层上盘浚县隆起为太古界，隆起西陡东缓，向东倾伏，地表零星出露下古生界，呈残山分布于平原上。下盘汤阴凹陷沉积了巨厚的新近系。从地貌上看，沿断裂东侧浚县隆起出露新近系湖相沉积物，形成垅岗地形，西侧形成一条狭长的洼地，新近系湖相沉积物被第四系冲洪积物埋于地下 10~48m。河流坡降比较明显，在淇河西板桥坡降突然变陡，在卫河一段坡降值为零。这反映了汤东断裂西盘沿此段有明显的下沉。沿断裂为布格重力异常梯度带通过处，地壳厚度在 34~36km 之间，其深部断差达 1~2km。断裂南段对第四系等值线有明显的控制作用。沿断裂发生过 1814 年汤阴 5 级地震和 344 年卫辉 6 级地震，为晚更新世活动断裂。

3) 长垣断裂

该断裂北起山东卫城，经长垣，南到封丘。走向北北东，倾向南东，倾角 50°。西盘上升，东盘下降。区内长约 120km。上盘为中生代及新生代地层，下盘为古生代及新生代地层。它由数条平行的断裂组成，如仙庄断裂，清河头断裂，郎中断裂和芦岗店断裂等，彼此呈平行排列形式出现。从钻孔资料得知，断裂从古近系顶部断至寒武—奥陶系，东盘下沉、西盘上升，断距可达 2000m。它控制了中生代地层的沉积，而且

又切割了新近系。在断裂南段新近系断差达300m左右。第四纪断差达40m左右。说明该断裂形成于燕山期，喜山期以及第四纪早、中期有继承性活动，为早更新世断裂。

4) 黄河断裂

该断裂北起范县，南至封丘，纵贯东濮断陷中央。断裂走向北东东，倾向北西，倾角 $40^{\circ}\sim70^{\circ}$ ，是控制断陷内部二级构造单元的二级断裂。它形成于中生代末或早第三纪早期。由于该断裂的存在以及长期活动，使断陷内形成了“两凹夹一隆”的构造形态。说明该断裂在第四纪有继承性活动。通过地球物理勘探发现该断裂为早更新世活动断裂。沿断裂于1502年发生过濮城 $6\frac{1}{2}$ 级地震。

5) 聊城-兰考断裂

该断裂南起兰考县，向北经范县、聊城至韩屯转向北东，全长约360km，区域内仅是该断裂的南段。断裂走向 $20\sim30^{\circ}$ ，倾向北西，倾角 $50\sim70^{\circ}$ ，为一上陡下缓的铲形滑脱正断层。该断裂是华北盆地与鲁西隆起的分界断裂，在中、北段控制西侧的莘县凹陷和东濮凹陷的发育。断裂下盘的鄄1孔孔深826m穿过新生界见石炭系，而上盘东参1孔深达3335m尚未穿过新生界。从断裂两盘第四系厚度对比表明该断裂仍在持续活动，下降盘的东参1孔第四系厚度可达329m，而断层东侧的上升盘，第四系仅170~200m。人工地震结果表明（石油部门），该断裂为一断面倾向北西的正断层，并且断距愈往深处愈大。从新近系至奥陶系顶面断距由100~200m加大到7500m，而第四系底面落差达40m左右。布格重力异常沿断裂形成窄且密集的陡变带，陡变带宽约5~10km，最大变化梯度达 $4.2\times10^{-5}\text{ms}^{-2}/\text{km}$ 。航磁异常沿断裂也有明显的显示。地壳厚度和上地幔高导层埋深也形成较明显的梯度带。水准测量（1980~1988）表明上盘仍在下沉，速度为0.73mm/a。沿断裂及其两侧发生过多次中强地震。

根据山东地矿局第二水文地质工程地质大队（1988）编的第四系地质剖面（图2.4.2和2.4.3），早、中更新世断裂两侧垂直差异运动明显。剖面通过禹城和聊城东南侧，新近系断差达100~200m，早、中更新世断差达50~100m左右（虢顺民等，2001）。

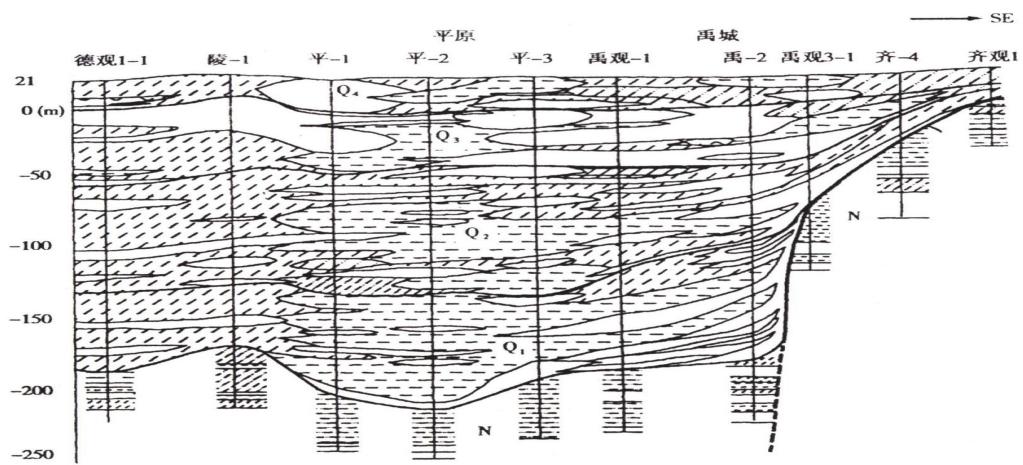


图 2.4.2 平原—禹城钻孔地质剖面 (VI)

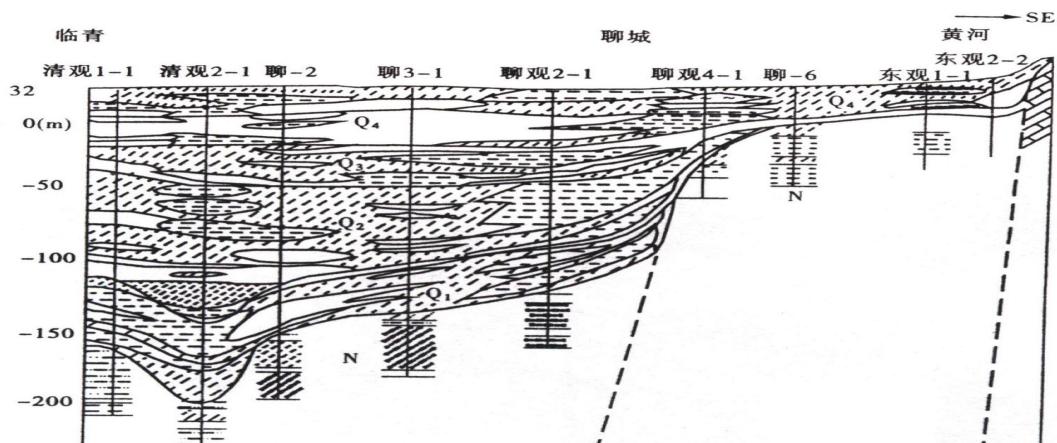


图 2.4.3 临清—聊城钻孔地质剖面 (VIII)

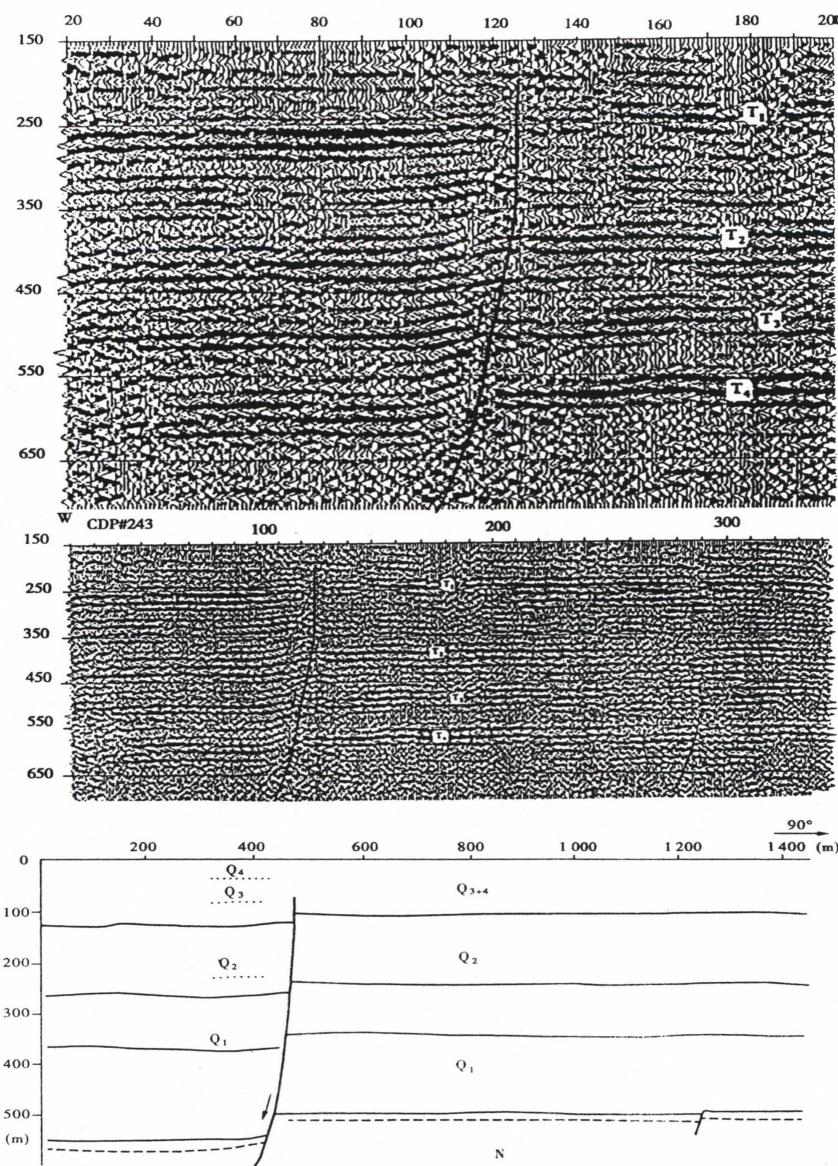


图 2.4.4 兰考愍庙浅层地震剖面（上、中）及地质解释（下）图（王基华等，2001）

据王基华等（2001）对断裂进行浅层地震勘探研究，发现穿过兰考愍庙的浅层地震剖面，断层活动影响到晚更新世地层（图 2.4.4）。可见，聊城-兰考断裂是一条晚更新世—全新世早期活动的断裂，1937 年断裂附近还发生过菏泽 7 级地震。

6) 曹县断裂

该断裂北起阳谷，经梁山、曹县、睢县至太康北，长约 200km 左右。总体走向北北东 - 北东，呈“S”型展布，并错断了近东西的汶泗断裂、郓城断裂、菏泽断裂、凫山断裂和北西向的新乡 - 商丘断裂。倾向东 - 南东，倾角上陡下缓成铲状。

该断裂在不同的时期有分段活动的特点，古近纪时期断裂整体活动，但以曹县-成武活动较强烈，致使成武坳陷形成古近纪沉积盆地。早更新世以来，断裂北段活动，

使下更新统被限制在断裂以西，而断裂南段早更新统为超覆沉积。曹县断裂切错了一系列近东西向的断裂，而一些中、小地震主要集中在切错交汇部位，说明曹县断裂在第四纪时期仍在活动，推测为第四纪早、中更新世活动断裂。

7) 巨野断裂

该断裂北起巨野，向南经成武，至宁陵。北段走向南北，倾向西，南段走向北东，倾向北西。北段为成武断陷的东界，它与曹县断裂一起控制了成武断陷下第三系的沉积，使断陷两侧缺失下第三系。新近纪至第四纪，断裂垂直差异活动减弱，变为水平错动为主。山东境内明显切断有第四纪活动证据的东西向断裂，近场区内右旋错断了新乡—商丘断裂，1622年郓城6级地震就发生在本断裂与东西向郓城断裂交汇处。

8) 嘉祥断裂

北起东阿以东，向南延伸，经嘉祥交于新乡—商丘断裂。走向近南北，北段呈弧形向西突出，倾向东，倾角 $75^{\circ} \sim 80^{\circ}$ ，为一正断层。下盘为太古界和下古界地层，与上盘中生界地层呈断层接触，并上盘向南推移4km左右。下盘下古生界地层出露地表，上盘N+Q厚度200~300m。沿断裂有燕山晚期花岗岩侵入，重、磁异常为密集梯级带。从新近纪和第四纪沉积厚度在断裂上、下盘的差异表明该断裂仍在持续活动。

9) 郓城断裂

该断裂为汶泗盆地的南边界，呈近东西走向展布，长约120km，是由物探资料推测，局部经钻探控制的一条平原区内的隐伏断裂。该断裂在布格重力图上显示为近东西向的负异常带。断裂在古近纪时期有强烈的活动，它对汶泗断凹古近系的沉积有明显的控制作用，其上部被第四系覆盖。根据煤田钻孔资料，断面倾向北，为陡倾斜正断层（局部为逆断）。古近纪时期活动强烈，致使盆地内堆积的古近系厚达1000~2000m。新近纪以来断裂南北沉积厚度相差100m以上。

该断裂在卫星影像上有一定反映，尤其是在兗州以北的大厂经马厂至白石桥一段，显示明显的线性影像特征，反映出了郓城断裂的构造形迹。

为了确定断裂的位置，前人曾做过几条地球化学探测剖面，在进行的Rn和 γ 断层气测量剖面上有清晰的异常反映（山东省地震局，1989）。

在新驿镇北，李塘村南横跨断层布设4个钻孔（孔距20~30m，孔深50m），根据剖面中的 ^{14}C 年代测定，进行钻孔资料对比表明（图2.4.5）（山东省地震局，1989），地面以下5m内的地层为全新统，其沉积是连续的，地下5m至21m的黄褐色粘土以及中砂层的顶面断差达1.5m，30m以下断差增大可达3m。表明该断裂晚更新世早期

仍有过明显的活动，但活动强度较弱。

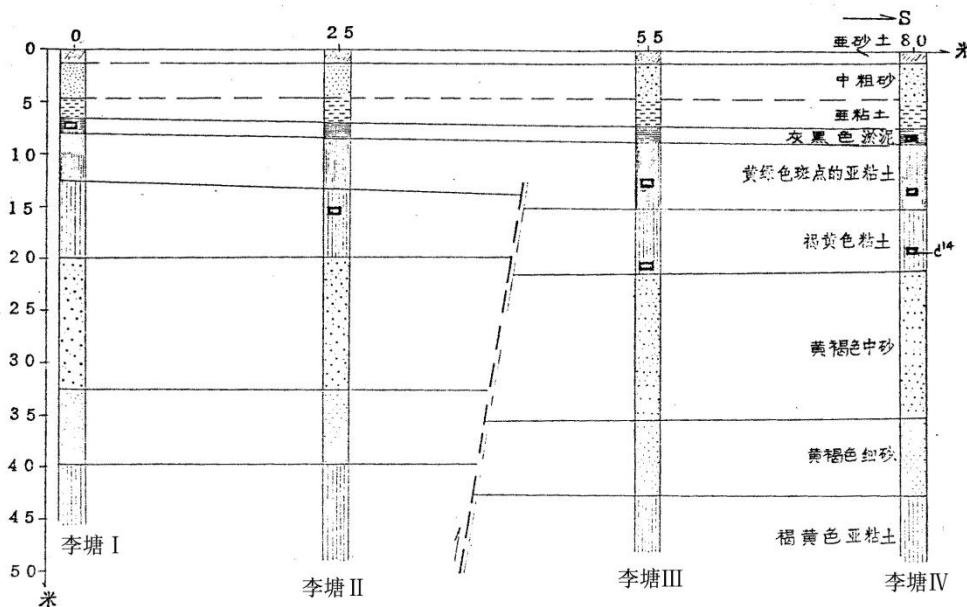


图 2.4.5 郓城断裂钻孔联合剖面图（李塘村附近）（山东省地震局，1989）

沿断裂带历史上曾于 1622 年在郓城附近曾发生过一次 6 级地震。由上述资料推测其最新活动时代为晚更新世。

10) 新乡-商丘断裂

西起新乡市北，向南东方向延伸，经延津塔铺、封丘、兰考、民权、商丘、夏邑延入安徽省境内，长达 250km，区内长 220km。根据重力、航磁资料，尤其航磁异常延拓 10km 和 20km 后，具有明显反映，至少有两条近于平行的断裂组成。走向 300°，被北北东或北东向断裂切割成若干段，倾向多变（北东或南西）。据钻孔资料，封丘—兰考一带有喜山期玄武岩、安山岩及酸性火山岩等分布。该断裂控制了开封凹陷及新生界的沉积，构成了开封凹陷的北缘断裂。该断裂以北，以北东向和北北东向构造块体和断裂为主，河流的流向自南西向北东二者走向一致。该断裂以南，以近东西向和北西向构造盆地和断裂为主，河流的流向自北西而南东流去，河流与构造线的方向趋于一致。说明该断裂是一条控制构造和地貌差异的分界断裂。

该断裂切割了古生代和中生代地层，呈左旋扭动正断层，北盘上升，南盘下降，新近系断差达 600m，第四系断差仅为 20~80m，历史上古黄河沿断裂通过（赵景珍等，1984）。具多期活动，根据地震资料表明第四纪早期具有强烈活动特征，属早、中更新世断裂。

沿此断裂带地震活动亦较频繁，公元 344 年卫辉 6 级地震，1737 年封丘 5 级地震

和 1978 年新乡 4.5 级地震等。这些地震的震中基本上落在北西向断裂与北北东向断裂的交汇部位。

11) 许昌-太康断裂

断裂西起许昌北、经鄢陵向东延到太康，止于北东向曹县-太康断裂西侧。呈近东西向分布，全长 135km。西段分布于太康凸起上，东段成为太康凸起与周口凹陷之间的分界。为倾向向南的正断层。断裂控制基底的升降差异，北侧隆起，南侧下沉，落差达 2~3km。新近纪和第四纪断裂继承性运动，北部沉积厚度 800~1000m，南部厚度 1400~1600m，落差达约 600m。据此推测为早、中更新世活动断裂。沿断裂有多次中强震发生，如 1820 年许昌 6 级和 1675 太康 $5\frac{1}{2}$ 级地震和 2010 年的 4.7 级地震。

12) 鲁山-漯河-太和断裂

断裂西自车村西，经鲁山、叶县北、漯河南，再向东南经老城进入安徽境内，全长大于 280km。呈北西西向展布。断裂西段（鲁山以西）分布于震旦系基岩内，对大地貌有一定的控制作用，断裂走向与山脉延伸方向一致。东段（鲁山以东）全部隐伏于新生代盆地组成的周口凹陷内（地质部西北地质局，1965），断裂使基底产生南盘升、北盘降的垂直差异运动，断差达 1000~2000m。新近纪以后断裂为正断层运动性质，鲁山-漯河段南降北升，断差达 300m 左右漯河—老城段南升北降，落差达 500m 左右。对第四纪地层的沉积有明显控制作用，其厚度北厚南薄，其断差达 40~60m。推测为早、中更新世断裂。沿断裂于 1662 年发生过项城 $5\frac{1}{2}$ 级地震。

13) 夏邑-太和断裂

该断裂北起夏邑向南西方向延伸，经太和、潢川、光山，止于新县西南。走向北北东，倾向北西西，全长约 300km。该断裂南段切割古生界、中生界及新生界部分地层。平原覆盖区根据地球物理勘探资料确定断层存在。山区构造形迹清楚，断裂破碎带、断层崖、断层三角面发育。沿断裂有燕山期花岗岩分布。在断裂附近曾发生 1959 年 7 月潢川 5 级地震。此后小震多次发生，表明该断裂为第四纪活动断裂。推断该断裂为第四纪早期活动断裂，最新活动时代为早 - 中更新世。

14) 永城-固始断裂

该断裂北起永城境内，向南方向延伸，经安徽省老人集、阜阳，到达固始县南。走向 NNE，倾向 NWW，视倾角 70 度，长约 250km。该断裂为阜阳中-新生带构造盆地

的东界，控制了盆地的发育。阜阳盆地基底埋深最厚达 600m。平原区根据地球物理勘探资料推测，确定断层的存在和空间的展布位置。基岩出露区构造形迹清楚，可见破碎带、断层崖，沿断裂有花岗岩侵入。在断裂带中曾经发生 1481 年涡阳 6 级地震。据此推断该断裂为第四纪早期活动断裂。

2. 4. 3 断裂活动与地震的关系

通过区域内断裂活动性的分析得出的基本结论是：晚更新世、特别是全新世以来活动的断裂与历史上发生的强震、中强震有密切的关系，某些隐伏的早、中更新世断裂可能与中强地震的发生有一定的关系。

- 1) 作为第四纪活动块体的边界断裂是强震和中强震的发震断裂，如山西隆起与华北凹陷之间的边界断裂：汤西、汤东断裂和新乡-盘古寺断裂历史上多次发生过 5~6 级地震。
- 2) 晚更新世至全新世仍有活动的断裂是大震的发震断裂，如聊城-兰考断裂历史上发生过一次历史地震，其震级达 7 级（菏泽地震）。
- 3) 晚更新世活动断裂是强震和中强震的发震断裂。如汤东断裂历史上发生过一次 6 级地震。
- 4) 第四纪垂直差异运动强烈的早、中更新世断裂，强震和中强震活动也较频繁，如新乡-商丘断裂历史上发生过 6 级和 $5\frac{1}{2}$ 级地震，鲁山-漯河断裂上发生过项城 $5\frac{1}{2}$ 级地震。
- 5) 某些早、中更新世隐伏断裂可能与强震、中强震活动有关，如许昌-太康断裂上发生过许昌 6 级地震，曹县断裂上发生过太康 $5\frac{1}{2}$ 级地震等。

2. 5 区域地震地质环境分析

2. 5. 1 区域地震地地质环境特点

区域内涉及 1 个一级大地构造单元，即华北准地台。华北准地台是较为活动的构造单元，但其南部活动性又相对较弱。从所处的大地构造部位而言，区域北部稳定性较差，历史上发生过 6~7 级强震，南部稳定性较好，仅有 5 级左右地震发生。

从地球物理场方面看，区域内重磁异常和地壳厚度三者有较好的一致性，且与地震的空间分布有较好的对应关系。区内存在北东、北西西、近东西向的重、磁异常梯度带和地壳厚度转折带，发生的地震多与这些异常带有关。如菏泽 7 级地震与聊一兰

考重力梯度带和航磁异常带分布一致。

新构造时期，区域内不同地区构造运动强烈程度，断裂活动的方式、地震活动等方面有着明显的差别。根据这些差异，本区域划分出3个一级新构造单元和多个二级构造单元。根据两级构造单元活动特征及其与地震的关系分析，二者有密切的联系：一、二级新构造分区界线是地震发生的主要场所，如修武6级和封丘 $5\frac{1}{2}$ 级地震以及菏泽7级等地震即发生在太行山东麓、新乡—商丘、聊城—兰考新构造运动的边界带上；有的地震发生在垂直差异运动强烈的地带上，如卫辉6级、封丘 $5\frac{1}{2}$ 级地震即发生在开封凹陷与内黄凸起之间差异运动强烈的地带；凹陷内下沉最强烈的部位是地震发生的场所，如洛阳发生的4级地震与该区的强烈下沉有关；凸起内局部下沉的部位也是地震发生的场所，如太康凸起上的两个局部下沉区历史上发生了许昌6级和荥阳5级地震。

区域内断裂构造发育，虽然晚更新世活动断裂，特别是全新世活动的断裂分布较少，但它们是强震和中强震的发震断裂；区内较多的某些隐伏的早、中更新世断裂可能与中强地震发生有关。全新世有过活动的聊城-兰考断裂发生过菏泽7级地震；几条晚更新世活动断裂历史上都有发生过地震的记载，如汤东断裂历史上发生过一次6级和一次 $5\frac{1}{2}$ 级地震；某些地震的发生其空间位置与隐伏的早、中更新世断裂有关，如新乡-商丘断裂发生过6级和 $5\frac{1}{2}$ 级地震，鲁山-漯河断裂上发生过 $5\frac{1}{2}$ 级地震，许昌-太康断裂上发生过6级地震，曹县断裂上发生过 $5\frac{1}{2}$ 级地震。

地震活动与现今地壳形变强烈程度密切相关：地震发生在地壳形变高梯度带、升降差异强烈的地区，如聊城-兰考形变梯度带发生过多次6~7级的地震；两组或两组以上方向的形变速率等值线走向交汇或转折部位是强震发生的地方，菏泽地区是北东、东西梯度带转折的部位，历史上是强震发生区；形变梯度带较宽缓的地区易发生中强地震，历史上发生过5~6级地震；形变速率值显示的下沉中心是地震分布的地区，如郑州-开封-许昌沉降中心发生过多次5~6级地震。

2.5.2 中、强震发生的构造条件

不同强度地震发生的构造条件有着明显的差异。根据区域范围内的新构造、地球物理场、断裂活动性特征等，归纳出下面区域内地震发生的构造条件。

1) $M \geq 7$ 级地震发生的构造条件：

①新构造时期存在强烈差异活动的次级块体边界；

- ②晚更新世至全新世具有明显活动的断裂，如聊城-兰考断裂；
- ③新近纪至第四纪具有强烈活动的断陷盆地，如东明凹陷及其主断边界（东边界）；
- ④布格重力异常梯度带、航磁异常带、地壳厚度转折带等均是这一级别地震发生的地方，如聊城-兰考一带即属这样的地球物理异常带；

⑤现代形变的高梯度带；

区域内发生的一次 7 级菏泽地震即与上述构造条件有关。

2) $M=6\sim6.9$ 级地震发生的构造条件：

- ①具备发生 $M\geq7$ 级地震的构造条件，同样会发生 $6\sim6.9$ 级地震；
- ②重、磁异常带和地壳厚度转折带容易发生这一级别的地震；
- ③一、二级新构造分区界线是这一级别地震的发生带，如修武 6 级地震即发生在太行山东麓、新乡-商丘新构造运动分区的边界带上；
- ④晚更新世断裂是这一级别地震发生的重要条件，如汤西、汤东断裂历史上即发生过一次 6 级；
- ⑤少数早、中更新世断裂历史上也曾发生过强震，如许昌-太康断裂上曾发生过许昌 6 级地震；
- ⑥地震形变梯度带，如许昌 6 级地震发生在这种形变梯度带上；

3) $M=5\sim5.9$ 级地震发生的构造条件：

- ①发生过 $M\geq6$ 级地震的地区容易发生这一级别的地震；
- ②地球物理异常带是这一级别地震发生的重要场所，如汤阴 $5\frac{1}{2}$ 级地震、鄢陵 $5\frac{3}{4}$ 级地震、项城 $5\frac{1}{2}$ 级地震等即发生在这类异常带上；
- ③新构造运动差异带，如封丘 $5\frac{1}{2}$ 级地震发生在开封凹陷与内黄凸起之间的差异带上；
- ④早、中更新世活动的隐伏断裂可能与这一级别的地震有关，如太康 $5\frac{1}{2}$ 级地震、项城 $5\frac{1}{2}$ 级地震的发生与曹县断裂和鲁山-漯河断裂有关；
- ⑤现代地壳形变的下沉中心也会发生这一级别地震。

2. 5. 3 区域地震构造综合分析

区域地震构造环境中对本场址有较大影响的主要构造有：汤阴地堑、东濮地堑构造单元。它们都具有北北东向控制坳陷、隆起发育的大型断裂，并且这些断裂多发生于大型隆起与坳陷的边界断裂带上。

上述地震构造中，第四纪以来多期活动，聊兰构造带上 1937 年发生过菏泽 7 级地震，符合 7.0~7.5 级地震的发震构造条件，具有发生 7.0~7.5 级地震的背景。

区域地震构造环境中对本场址有影响的主要构造还有：新乡—商丘断裂，许昌—太康断裂、曹县断裂、巨野断裂、夏邑-太和断裂。它们符合中强地震的发震构造条件，具有发生中强地震的背景。

3 近场区地震构造特征

本章在收集、分析已有的调查资料和研究成果基础上，结合本项目进行的野外地震地质补充调查，对近场区的地质构造概况、新构造运动特征、主要断裂活动性和地震构造环境等加以论述，为近场区的断裂活动性鉴定和潜在震源区划分提供依据。

3.1 近场区地质构造概况

3.1.1 地质构造基本格架

近场区大地构造上位于华北断块区中南部，跨太行山断块隆起区与河北平原沉降区两个一级新构造单元，地质构造总体上以宽缓的向背斜为特征，断裂活动强度和幅度不大，主要构造线走向呈北北东-北东向，并有北西西-近东西向构造线与之交汇，将本区分划成一系列规模大小不等的菱形地块。工程场地位于太行山隆起区内。

深部构造方面，本区位于华北克拉通内部主要的地壳厚度梯级带附近，莫霍面深度33~35km。上地壳构造以清晰的滑脱构造活动为特征，物探揭示的滑脱构造影响深度约5~6km。深部构造不均匀性控制下上层地壳的滑脱变形和分异，是近场区地质构造活动的基本程式。

近场区地壳构成除古老的结晶基底外，上地壳主要由元古代和古生代巨厚海相碳酸岩地层组成，新生代时期为一套陆相碎屑岩堆积。西部太行山区地表主要出露太古界、元古界震旦系、古生界寒武系、奥陶系、石炭系和二叠系，局部地点有中生界。东部丘陵及平原区主要出露上新、古近系和第四系，有寒武系垄岗剥露地表。坳陷内堆积巨厚的新生代陆相地层，除古新统外，从始新统至全新统发育齐全，成因类型复杂。

近场区岩浆活动不甚发育，侵入岩体仅在少数地方零星出露，如近场的西北部地区。侵入岩体的时代主要为燕山期，以中性闪长岩为主，其同位素年龄为距今1.18亿年左右。新生代在黑山、庞村一带有玄武岩溢流和喷发活动。

3.1.2 地质演化史

作为稳定的华北克拉通的组成部分，本区以强烈变形的结晶基底、稳定沉积的上部盖层为特征。根据区域沉积和变形特征，近场区地壳发育可划分为如下几个主要活动阶段：

前震旦纪时期，结晶基底发育，以强烈的构造变动和岩浆活动为特征，后期的构

造运动使结晶基底强烈变形，多形成紧闭褶皱。

震旦纪到奥陶纪，为本区主要的盖层发育阶段，在全区普遍沉积了一套滨浅海相砂岩、灰岩及泥灰岩。大约从泥盆纪开始，本区地壳全面隆升，可能伴有轻微褶皱运动，除局部地区外，缺失该阶段的堆积记录。根据区内地层构造发育特征分析，从地壳形成到中生代末期，本区构造发育具有整体性特点，构造分异活动不明显。

新生代是近场区构造活动的一个新的阶段，在区域性深部构造活动的控制下，以华北平原拗陷形成功育为标志，本区地壳发育进入分异状态，太行山山前断裂带强烈滑脱活动，本区东部开始堆积新生代陆源碎屑沉积，西部地区继续处于隆升环境中。新构造以及现今的地壳运动，基本上是新生代构造运动的空间差异性和上地壳滑脱活动的继承。

3.2 近场区新构造运动特征

近场区新构造运动总体上以缓慢的地壳抬升运动为特色。在新、古近纪强烈的块体差异升降以及由此引致的鲜明地貌对比格局的基础上，新构造时期内外力地质作用主要表现为削高填低，构造地貌对比逐渐趋缓，新的沉积物堆积不厚，地壳差异运动不断减弱。

3.2.1 晚新生代地层

1. 新近系（N）

主要由上新统的鹤壁组和庞村组组成，主要分布于汤阴、鹤壁一带的丘陵地带以及浚县隆起上，汤阴地堑内主要出露于宜沟东河头、卫辉西北和新乡北潞王坟一带。

上新统的鹤壁组为一套河湖相碎屑沉积物。根据岩性可大致划分为三个岩性段，下段岩性以灰质砾岩为主，夹粘土及砂岩，砾石成分多为灰岩，少量紫色页岩、石英砂岩等，磨圆度好，砾径多为1~10cm，砂质和钙质胶结（图3.2-1）；中段为紫色粉砂质粘土岩及粘土；上段为灰色灰质砾岩夹紫红、黄色粘土，钙砂质胶结，一般较紧密。在野外考察中，我们发现一条新近系鹤壁组的中、上段地层被明显错断的断层（图3.2-2）。



图 3.2-1 上新统鹤壁组砾岩（镜向东）



图 3.2-2 鹤壁组紫色粉砂质粘土岩、黄色粘土及断层（大邑村，镜向东）

受构造地貌的控制，鹤壁组地层从山前向盆地中心岩相呈有规律的变化，在西部太行山前主要为山麓相砾石层，往盆地内部逐渐过渡为河湖相粘土岩。

庞村组为一套火山玄武岩及火山凝灰岩，灰黑色，柱状节理十分发育。主要分布于庞村附近黑山等地，与下伏鹤壁组呈角度不整合接触，接触面可见鹤壁组湖相层具明显的烘烤边。

2. 下更新统 (Q_1)

主要分布于淇河与思德河等山口和山前丘陵地带，以及淇滨盆地内淇河沿岸，构成现代河床的第4级阶地，岩性为红色粘土胶结砾石层，砾石成分以石英砂岩及石英岩为主，表面均有铁锰薄膜，风化面呈黄褐色，砾石分选性差，砾径大小悬殊，一般20~50cm，露头区最大可见厚度25m。下更新统与下伏新近系不整合接触。图3.2-3为淇河湿地公园附近的公路旁发现的下更新统的粘土胶结砾石堆积。



图3.2-3 早更新世砾石堆积（镜头方向50°）

3. 中更新统 (Q_2)

分布于山间盆地和山前丘陵地带，构成河谷的三级阶地，在沧河、思德河、淇河等出山口处均有出露。岩性为棕红色、黄色粘土夹砂砾石层（图3.2-4）。粘土呈块状，可塑性强。所夹砂砾石呈层状或透镜状，砂质胶结，成岩作用差，较疏松，露头区最大可见厚度11m。



图3.2-4 中更新统黄色层状粘土（镜头方向284°）

4. 上更新统 (Q_3)

主要为洪积、坡积黄土状亚粘土或砂砾石层，汤阴地堑内为河流阶地堆积，上更新统地层一般呈灰黄色、黄色，垂直节理发育，结构松散，含钙质结核层。最大可见厚度 25m。

5. 全新统 (Q_4)

全新世地层在近场区内大面积分布，为残坡积、洪积、冲积亚砂土、亚粘土。西部山区河床堆积主要由砾石、砂、淤泥及粘土组成；东部平原河漫滩堆积为冲积相和风积相的粉砂质粘土、粉砂、细砂组成，局部夹淤泥。

3. 2. 2 地貌特征

近场区位于太行山东、南麓，主体位于山麓丘陵与山前平原的过渡地带。区内地势总体上西北高东南低，并大体上划分为太行山基岩隆起区和南华北平原沉降区两大地貌单位，其间还不连续分布有过渡类型的山前台地和丘陵区。

近场区西北部的太行山区为侵蚀低山及丘陵台地隆起区，局部见侵蚀中山地形。大体上以太行山山前断裂为东界，由鹤壁经庙口、青羊口、潞王坟转向西，过辉县北山、百泉，在黄水沿薄壁断裂带延向南西，海拔高度 500~800m 左右，黄水以西山区海拔达到 1600m 以上。区内发育有两级夷平面，I 级夷平面（北台期面）形成于古近纪早期，海拔高度在 1000m 以上，在中山区保留有该夷平面的残留面；II 级夷平面为中新世的构造剥蚀面，以海拔 400~800m 的低山丘陵区最为发育。

太行山前剥蚀缓倾斜地区在平面上大致以太行山山前断裂带的水冶断裂和汤西断裂为西、东界，主要限于汤阴以西地区，是太行山基岩区与南华北平原沉降区的过渡地带。本区新近纪晚期的剥蚀面海拔 200m 左右，剥蚀面上有上新统碎屑堆积物发育。

本区东部和南部广阔平坦的新生代沉积区，包括汤阴地堑、浚县台地以及太行山南麓堆积平原、黄河冲积平原，是南华北平原的一部分。这是以太行山山前断裂带为西界的广阔地区，地貌面由第四纪冲、洪积物构成，地势低平，地面标高 60~80m。根据钻孔资料，南华北平原在新、古近纪时期的地貌格局，是在断裂控制下的断陷和断隆南北分带、东西分块状态；第四纪期间，该区的地貌分异状态已经基本消失，而代之以整体的拗陷状态，统一的南华北平原发育完成，仅个别单元有轻微的差异运动，如浚县隆起相对于汤阴地堑的抬升等。

3. 2. 3 新构造单元划分

根据近场区新构造运动的时空特征，结合区域构造特点，近场区可主要划分为南华北平原断陷区、太行山隆起区两个一级新构造单元。南华北平原断陷区又可进一步

划分成太行山东缘差异沉降区、汤阴地堑、浚县隆起三个次级单元。

1. 华北平原断陷区（Ⅰ）

华北平原是华北陆台上的新生代断陷区。平原的基底形成于太古代和元古代，盖层构造主要受燕山运动影响。中生代时期华北平原为隆起区，局部发育了断陷盆地。新生代以来，断块作用活跃，早第三纪时期形成一系列次级断陷盆地；晚第三纪和第四纪时期，堆积范围逐步扩大，形成连片的大平原，与此同时平原边缘断块山地相对隆起，大平原轮廓日趋鲜明。新生代相对下沉，接受了较厚的沉积，局部沉积竟达千米。南华北平原断陷区位于华北平原断陷区的南部。

①太行山东缘差异沉降区（Ⅰ₁）

包括汤西断裂带南段以西、薄壁断裂带以东的辉县地区。根据物探结果，该区新构造活动除表现出由北西向南东的掀斜外，还以九里山断裂为界，可主要划分成薄壁地堑和赵固地垒等次级隐伏构造单元。其中薄壁地堑系由薄壁断裂和九里山断裂为边界的双边地堑，南界为峪河—新乡断裂。钻孔揭露地堑内新近系地层厚度达1000余米，第四纪以来沉降幅度不大，最大沉积厚度约40m左右，沉降中心位于上八里以东。

②汤阴地堑（Ⅰ₂）

分布于太行山山前断裂带以东，是太行山隆起和浚县隆起之间的北东向地堑。

汤阴地堑分别以汤东断裂和汤西断裂为边界构成双边地堑，南北截于安阳南断裂和新乡—商丘断裂带附近，总体走向北北东，南北延伸约110km，东西宽20~25km。物探揭示地堑两侧的地层断距很大，基岩落差超过100m（图3.2-6）。

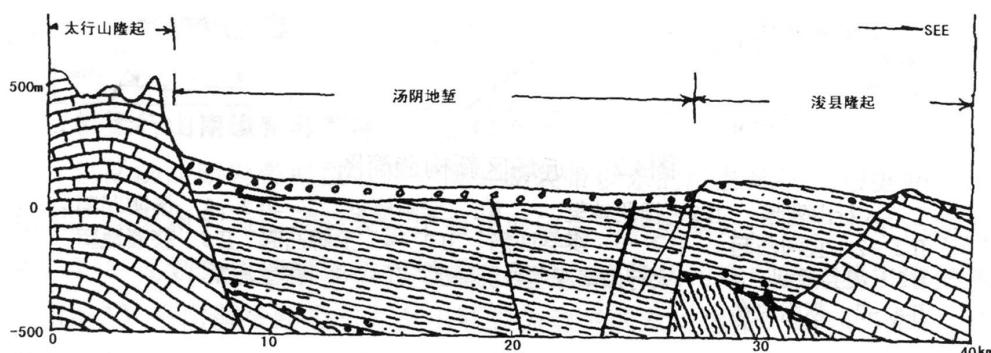


图 3.2-6 汤阴地堑综合横剖面图

在淇县和卫辉一带形成地堑的两个沉降中心，地堑两侧的断距很大，基岩落差超过1000m，东侧较深，基岩埋深在2000m以下，西侧较浅。但沿地堑向北，汤西断裂渐向北东向偏转，并在淇县以北的宜沟附近消失。北段由汤东断裂构成“半地堑”，

总体呈单斜挠褶式变形。

汤阴地堑主要活动在新、古近纪时期，钻探资料揭露地堑内新生界厚度可达2000~3000m，有两个拗陷中心，一个在汤阴附近，另一个在卫辉东北，最大厚度3000余米。第四纪以来，汤阴地堑总的运动趋势表现为微弱的上升，因此，第四系一般平均厚度仅10~30m左右，只有局部沿断裂活动的地段有40~50m厚的沉积物，如汤阴一带第四系厚40m。有的地段新近系地层直接露出地表，构成残丘，如卫辉城东北的黄土岗一带便是由新近系地层构成的海拔97m的土丘。

汤阴地堑内部的新构造活动特点是：在垂直运动方面，地堑随同其东西两侧的太行山台地和内黄凸起一起回返上升，并且向东南掀斜，使新、古近纪古湖泊消失，地堑两侧的断裂只有很小幅度的垂直活动；在水平方面，在北东-南西主压应力的作用下，地堑两侧断裂发生右旋运动。地堑内部在两断块的右旋剪切力作用下，形成了次一级的雁行状构造。

根据地堑内第四系的厚度及微地貌分析，第四纪以来地堑内部的活动存在空间不均一性，表现为局部隆起与沉降交替，总体上形成两隆、两凹的构造形态。由北而南分别是汤阴凹陷、宜沟凸起、淇县凹陷和卫辉凸起。

汤阴地堑及其主要控制性断裂构造，在第四纪乃至第四纪晚期仍有明显的活动，历史上有多次5~6级地震发生，对工程场地地震安全性有重要影响。

③浚县隆起(I₃)

浚县隆起（区域上称内黄隆起）位于近场区东部，西邻汤阴地堑。浚县隆起以太古代古老变质岩和早古生代地层为基底，表层覆盖有200~500m厚的新近系，总体上为向南东倾斜的单面山式隆起，是基底整体性较好的坚硬地块。隆起中心在浚县北部五陵镇-王庄集一带地表盖层约厚300m左右，局部地点基岩直接出露地表，表明内黄凸起古近纪表现为向东掀斜的抬升区，直到新近纪以后，才整体接受新近系和第四系沉积，新构造期以来本区为相对隐伏的隆起区。

2. 太行山隆起区(II)

太行山山前断裂带以西地区是一个新生代隆起区，据夷平面资料，古近纪以来最大抬升幅度达1500~2000m，新构造期的上升量约为100~300m（丁国瑜，1983）。近场区本单元地貌以低山丘陵、山间盆地及丘间洼地相间分布为特征，总体地势西高东低。

3.2.4 新构造运动基本特征

1. 区域性的地壳缓慢西升东降格局

区域性的地壳西升东降，首先表现为区内构造地貌的发育，西部为长期隆起的山

地，而东部则是广阔的沉降平原。夷平面资料表明，太行山隆起区古近纪以来最大抬升幅度达1500~2000m，相应的平原沉降量也达数千米。在新构造期，华北平原与周围山区的垂直运动相对幅度不大。扣除新、古近纪沉积自重压密这种非构造因素引起的下沉量，平原下沉总量约200~400m，与周围山区上升幅度100~300m大体相当，平原与山区之间总的升降幅度为400~700m左右，平均垂直差异运动速率为0.1~0.2mm/a。

2. 逐渐减弱的地壳差异升降运动

从整个地质历史过程来看，近场区新生代构造发展以地壳差异变形为突出特点，因而造成了本区东部数千米的沉降和堆积，以及西部地区上千米的抬升。根据对不同时期相关沉积的统计，本区地壳的差异运动新构造运动以来呈减弱趋势。如表3.2-1所示，包括汤阴地堑在内的几个主要构造单元上新世沉积厚度在700m以上，而第四纪沉积厚度仅30~40m。参考华北地区晚新生代地层发育序列特征，本区所划分的上新世和第四纪地层，其绝对年龄分别为距今3.4和1.6百万年左右，由此估算的地壳差异沉降速率相应为0.3mm/a和0.025mm/a。比较起来，第四纪的沉降速率差不多要比上新世低一个数量级。这种认识，与近场区内广泛存在的隐伏凸起和凹陷的存在也相一致，反映了新、古近纪时期强烈的地貌反差逐渐减少。

表3.2-1 近场区几个新生代地堑不同时期沉积厚度对比表（单位：m）

地质时代	安阳地堑	汤阴地堑 (汤阴)	汤阴地堑 (卫辉)
第四纪	70	40	30
新近纪	700	1400	1000
古近纪	2800	3100	3000

3. 区域地壳的掀斜变形

区域地壳的掀斜变形，首先表现为地貌面的倾斜方面，如汤阴地堑，地面总体上向东一致倾斜，如沿庙口-钜桥一线，地堑地面从90余米渐降至钜桥以东75m左右，物探揭示地堑内新生代地层也向东一致倾斜，而且地层越老，其倾角也越大（图3.2-7），显示地壳的掀斜运动具有同沉积特性。在鹤壁丘陵区南部，杨小屯附近上新世地层的变形，也显示了向南东方向的掀斜。

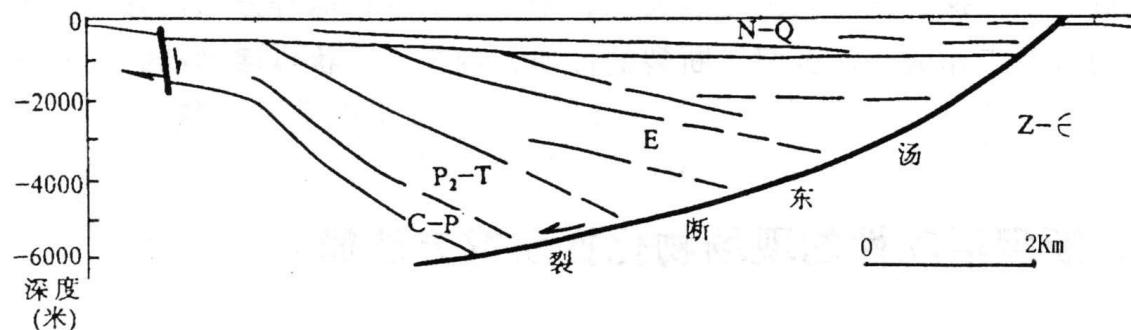


图 3.2-7 汤阴附近物探揭示新生代地层的掀斜变形

4. 区域北东东向构造应力场作用

可以通过区域构造活动形迹的分析，以及现代地震震源机制和断层面解的分析，来定性分析现今地壳应力状态。

本工程近场区位于华北平原区南部，其构造应力场与整个华北地区具有一致性，以北东向应力场作用为特征，表现为一系列北北东走向的断裂带的右旋活动与相应的北西向断裂的左旋活动。现代地震震源机制解也证实，该区现今地壳应力场主压应力优势方位为北东东向。

3.3 近场区主要断裂活动性

近场区断裂构造比较发育，主要构造方向为北北东向和北西向（表 3.3-1，图 3.3-1），现按各断裂编号顺序将其活动性评述如下。

表 3.3-1 近场区附近主要断裂特征一览表

编 号	断裂名称	性质	走向	倾向	倾角	最新活 动时代	距工程场 地最近距离(km)
F1	洪峪断裂	逆断	NNE	SE		前 Q	16
F2	汤西断裂	右旋正断	NNE	SEE	>60°	Q ₁₋₂	2
F3	汤中断裂	正走滑	NNE	SEE	陡	Q ₁₋₂	9
F4	汤东断裂	正走滑	NNE	NW	陡	Q ₃	13
F5	西形盆-水峪断裂	正断	SEE	S		前 Q	8
F6	庙口-黄洞断裂	正断	SEE	S		前 Q	3
F7	卧羊湾断裂	正断	NW	S	陡	前 Q	7
F8	薄壁断裂	正断	NE	SE	50-70°	Q ₁₋₂	24

1. 洪峪断裂 (F1)

新华夏系逆断裂，主要包括两条近于平行的断层，断层破碎带宽约 10 米，岩石被挤压破碎，具糜棱岩化和劈理、构造透镜体发育。走向北北东，倾向南东。为前第四

纪断裂。

2. 汤西断裂 (F2)

汤南起新乡市西侧，向北经青羊口止于汤阴宜沟附近，全长 90km。走向 30° ，倾向南东，正走滑性质。该断裂南段新、古近纪均有过强烈活动，断裂西侧（上升盘）出露太古界及古生界以及少量的新近系，东侧（下降盘）新近系 - 第四系厚度可达千米以上（其中第四系较薄仅 30m）。根据新乡市活断层探测项目的浅层地震勘探资料，图 3.3-2 为用于控制汤西断裂 QDE1 测线反射波叠加时间剖面，该测线时间剖面上反射震相丰富，反射能量较强，在整条剖面上反射同相轴能量横向差别不大。根据该剖面纵向和横向的波组特征，从上到下可以识别出 6 组反射震相 (T_{01} 、 T_{02} 、 T_Q 和 $T_1 \sim T_3$)。在剖面桩号 3670m 和 1795m 两处存在明显的错断现象和波形畸变现象，表明在这 2 处存在断层 (FE1 和 FE2)。其中 FE1 断层视倾向东，视倾角较陡，FE1 断点向上错断了 T_Q 反射同相轴，FE1 断点为汤西断裂主断裂的反映。综上所述该断裂为第四纪早期活动断裂。

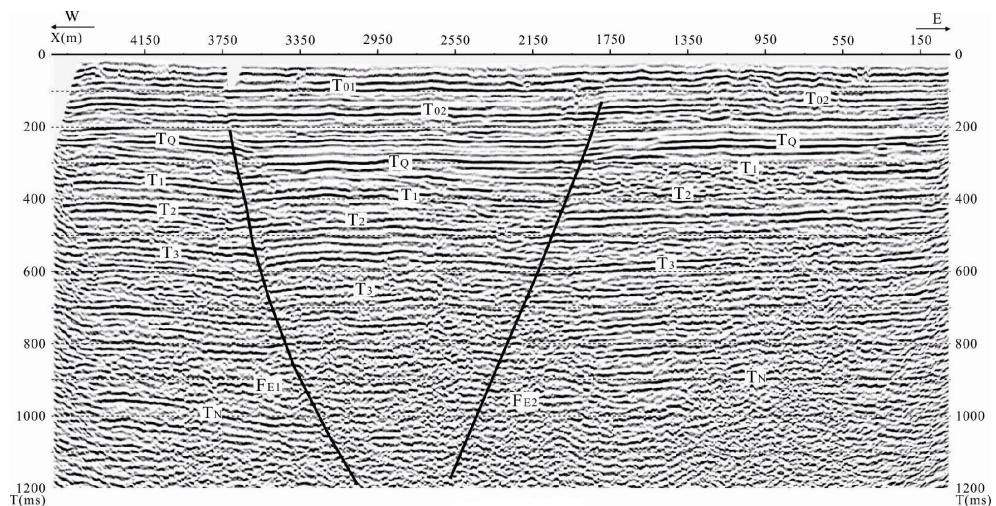


图 3.3-2 QDE1 测线反射波叠加时间剖面

3. 汤中断裂 (F3)

展布于汤阴地堑中部，全长 90km，正断层。在宜沟一带，汤中断裂取代了汤西断裂，是西部丘陵同东部堆积平原的界线，淇河通过汤中断裂，河流阶地下沉成了掩埋阶地。根据新乡市活断层探测项目的浅层地震勘探资料（图 3.3-3），由图可知 FE11 视倾向东，视倾角较陡，为汤中断裂的反映，FE11 断点向上错断了 T_Q 反射同相轴。综上所述该断裂为第四纪早期活动断裂。

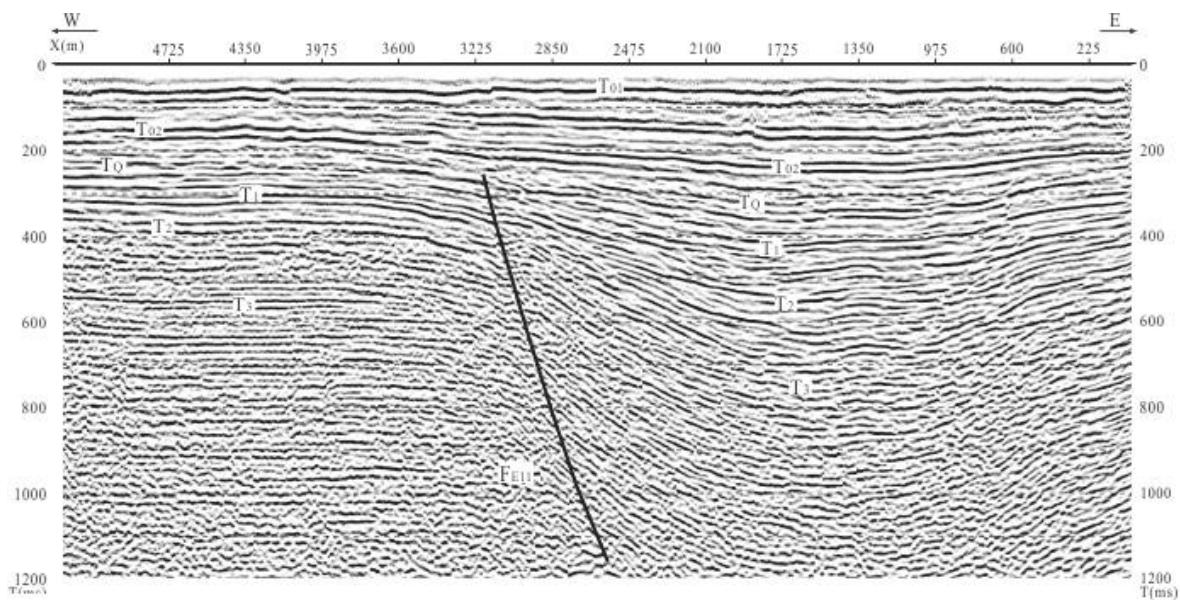


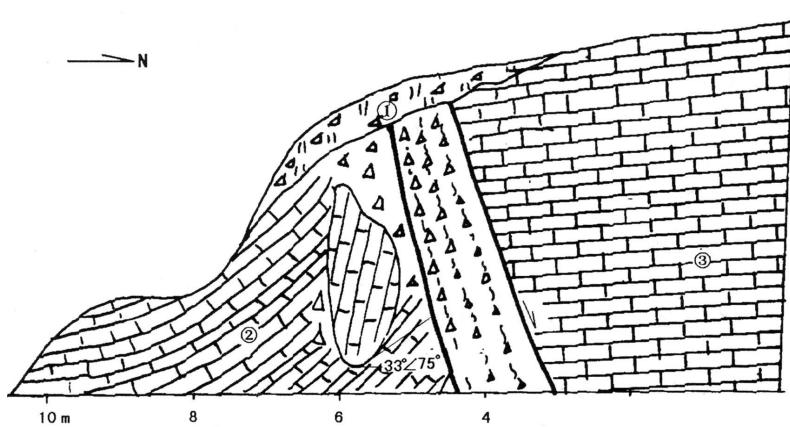
图 3.3-3 QDE5 测线反射波叠加时间剖面

4. 汤东断裂 (F4)

该断裂在近场区范围内为隐伏断裂，为汤东断裂的南段。断层以东为太古界组成的浚县隆起，隆起西陡东缓，向东倾伏，地表零星出露下古生界，呈残山分布于平原上；位于断层上盘的汤阴地堑沉积了巨厚的新、古近系。断裂东侧浚县隆起出露新、古近系湖相沉积物，西侧则形成一条狭长的洼地，新近系湖相沉积物被第四系冲洪积物埋于地下 10~48m。河流坡降比也反映了汤东断裂西盘有明显的下沉（中国地震局地质研究所，2003）。沿断裂为布格重力异常梯度带通过处，地壳厚度在 34~36km 之间，其深部断差达 1~2km。断裂南段对第四系等值线有明显的控制作用。结合区域资料分析认为，汤东断裂带中段第四纪早期有明显的活动，晚更新世仍有活动。沿断裂曾发生 344 年卫辉东 6 级和 1814 年汤阴 $5\frac{1}{2}$ 级地震，综合物探表明为晚更新世活动断裂。

5. 庙口 - 黄洞断裂 (F6)

断裂带主要由两条近于平行的断层组成，总体走向 $100\sim110^\circ$ ，断面南倾。在驼泉以东组成向北突出的缓弧形。黄洞一带断裂北盘是寒武系，南盘为奥陶系，垂直断距 200m。断裂西段，漕旺水附近断层破碎带宽 50 余米（图 3.3-4）。



① 四纪坡积物 ②薄层硅质岩 ③灰岩

图 3.3-4 潼旺水东庙口 - 黄洞断裂剖面（据中国地震局分析预报中心，1997）

与西形盆 - 水峪断裂带类似，庙口 - 黄洞断裂带由几条小规模的次级断层组成，区域延伸不远，地史上也没有控制区域地质演化发展，野外考察表明该断裂带没有控制地貌，估计新构造时期以来没有明显的活动。

通过上述分析认为，该断裂带为前第四纪断裂。

6. 卧羊湾断裂带 (F7)

卧羊湾断裂带东段走向 310° ，西段逐渐转为近东西向，总体上构成向北突出的弧形，断层面一般向南陡倾。断裂带在青羊口一带交于汤西断裂带之上。根据野外研究资料，断裂将太古界 - 元古界震旦系组成的宽缓背斜左旋位错，断裂两侧地层变形不强。在狮豹头等处，可见断层破碎带较为发育，但沿线均未控制地貌的发育。综合分析认为，卧羊湾断裂带为前第四纪断裂。

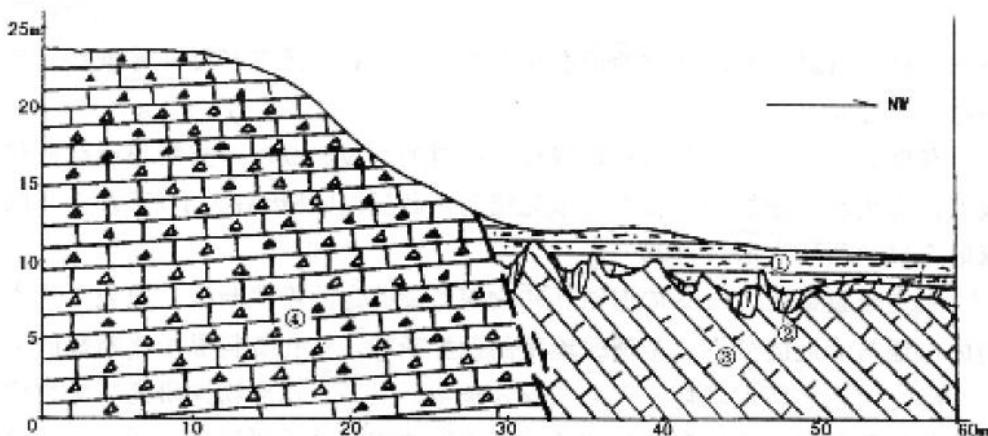
7. 薄壁断裂 (F8)

薄壁断裂南起焦作市巡返村，经峪河口，上八里、黄水，过南村盆地和淇滨盆地后继续向北延伸，总体走向 40° 。断裂带为正断层性质，倾角为 60° ，破碎带宽 $20\sim70m$ 。断裂带主要由两条相背或相向倾斜的断裂组成，晚更新世地层和地貌面均未见错动，断层泥 ESR 年龄大于 150 万年（张秉良等，1995 年）。地貌上呈直线形延伸，沿断裂下、中更新统呈长条形分布（刘尧兴，2001）。

薄壁断裂为一条依据钻孔和物探结果确定的隐伏断裂，地貌上基本构成山地与盆地的分界，是薄壁地堑的西界断裂，钻孔资料显示该断裂的主要活动时代在上新世晚期，上新统砾岩被明显错断。浅层物探研究结果也说明该断裂第四纪以来没有明显的活动（国家地震局地质研究所，1995）。该断裂自黄水往北出露于基岩中，在黄水乡北出露一个剖面，可见宽数米的断层破碎带，带内物质胶结坚硬，地貌上也没有反映。

该断裂北端从临淇盆地西侧通过，断层经过处早更新世砾岩未见变形，说明该断

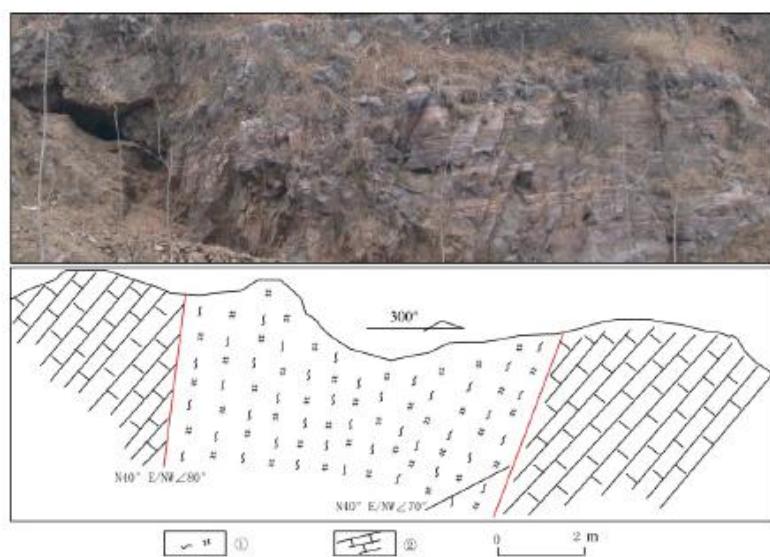
裂的活动主要在第四纪以前。在南村盆地，薄壁断裂向西倾斜，构成了盆地的东边界，野外考察发现南村盆地是在早期断裂活动影响下，在裂隙较为发育的灰岩地区形成的溶蚀盆地，盆地内仅有薄薄的一层第四纪沉积物，以下为埋藏的古岩溶（图 3.3-5），据此分析，南村盆地以及上面谈到的临淇盆地，不是构造盆地。



① 平层理粉砂层 ② 砖红土型风化壳 ③ 灰岩 ④ 角砾状灰岩

图 3.3-5 南村盆地东南缘地质剖面（据中国地震局分析预报中心，1997）

在辉县市上八里和寺庵处发现一宽约 8m 左右的断层破碎带（图 3.3-6），上新统 N₂ 红褐色砂砾岩被断层破坏，破碎带中夹有断层角砾岩和沉积物，破碎带走向约为北东 40°，倾角为 70°~80°，倾向北西，断层两侧均见有明显的垂直擦痕，反映断层的垂向运动。



① 上新统 N₂ 红褐色砂砾岩，表面强风化。② 断层破碎带

图 3.3-6 辉县市上八里和寺庵处薄壁断裂剖面图（指向西南，焦作市活断层）

3.4 近场区地震构造环境评价

根据前面对近场区地震地质和地震活动性特征的分析，结合区域地震构造研究成果，对近场区地震构造综合评价如下：

1. 近场区大地构造上位于华北断块区南部，断裂活动强度和幅度不大，主要构造线走向呈北北东和北西西向，将本区分划成一系列规模大小不等的菱形地块。跨太行山隆起区与南华北平原断陷区两个二级新构造单元，工程场地位于太行山隆起区。

2. 近场区新构造运动以明显的差异升降为特点，已有资料显示该区的强烈差异升降主要发生在新构造运动的早期，第四纪以来的地壳差异运动较弱。区内现代地壳运动总体上继承了新构造运动的特点并呈减弱趋势，表现为北东东向构造应力场下地壳的缓慢差异升降运动，西部为长期隆起的山地，而东部则是广阔的沉降平原。

3. 近场区破坏性地震，这里同时也是现代地壳差异活动最强烈的地段。近场区内曾发生过三次破坏性地震。一般发生在断裂附近，如 1814 年汤阴 $5\frac{1}{2}$ 级地震发生在汤东断裂带北段附近，344 年卫辉东 6 级地震发生在汤东断裂南段。

4. 近场区共发育有 8 条断裂，其中，4 条为前第四纪断裂，另外 4 条为第四纪活动断裂，最新活动时代为晚更新世。

综合分析认为：近场区具有发生中强以上地震的构造背景。

4 地震危险性分析

按照《工程场地地震安全性评价》(GB17741-2005)的要求,本章采用综合概率分析方法,对工程场区进行地震危险性分析。其内容是,依据区域及近场区的地震地质和地震活动性的研究成果,划分潜在震源区并确定其地震活动性参数,利用综合概率分析方法及地震动衰减关系进行工程场地的地震危险性概率计算。

4.1 地震危险性分析方法概述

本项目采用了《工程场地地震安全性评价》(GB 17741-2005)规定的地震危险性概率分析方法,其主要特点在于考虑了地震活动的时空不均匀性。其基本思路和计算方法概述如下:

① 首先确定地震统计单元(地震带),以此作为考虑地震活动时间非均匀性、确定未来百年地震活动水平和地震危险性空间相对分布概率的基本单元。地震带内部地震活动在空间和时间上都是不均匀的。

地震带内地震时间过程符合分段的泊松过程。令地震带的震级上限为 m_{uz} ,震级下限为 m_0 , t 年内 $m_0 \sim m_{uz}$ 之间地震年平均发生率 ν_0 , ν_0 由未来的地震活动趋势来确定,则统计区内 t 年内发生 n 次地震的概率:

$$P(n) = \frac{(\nu_0 t)^n}{n!} e^{-\nu_0 t} \quad (4.1.1)$$

同时地震带内地震活动性遵从修正的震级频度关系,相应的震级概率密度函数为:

$$f(m) = \frac{\beta \exp[-\beta(m - m_0)]}{1 - \exp[-\beta(m_{uz} - m_0)]} \quad (4.1.2)$$

其中, $\beta = b \ln 10$, b 为震级频度关系的斜率。实际工作中,震级 m 分成 N_m 档, m_j 表示震级范围为 $(m_j \pm \frac{1}{2}\Delta m)$ 的震级档。则地震带内发生 m_j 档地震的概率:

$$P(m_j) = \frac{2}{\beta} \cdot f(m_j) \cdot Sh(\frac{1}{2}\beta\Delta m) \quad (4.1.3)$$

② 在地震带内部划分潜在震源区,并以潜在震源区的空间分布函数 f_{i,m_i} 来反映各震级档地震在各潜在震源区上分布的空间不均匀性,而潜在震源区内部地震活动性是一致的。假定地震带内共划分出 N_s 个潜在震源区 $\{S_1, S_2, \dots, S_{N_s}\}$ 。

③ 根据分段泊松分布模型和全概率公式,地震带内部发生的地震,影响到场点地

震动参数值 A 超越给定值 a 的年超越概率为:

$$P_k(A \geq a) = 1 - \exp\left\{-\frac{2\nu_0}{\beta} \cdot \sum_{j=1}^{N_m} \sum_{i=1}^{N_s} \iiint P(A \geq a | E) \cdot f(\theta) \cdot \frac{f_{i,mj}}{A(S_i)} \cdot f(m_j) \cdot Sh\left(\frac{1}{2} \beta \Delta m\right) dx dy d\theta\right\} \quad (4.1.4)$$

$A(S_i)$ 为地震带内第 i 个潜在震源区的面积, $P(A \geq a | E)$ 为地震带内第 i 个潜在震源区内发生某一特定地震事件 (震中 (x, y) , 震级 $m_j \pm \frac{1}{2} \Delta m$, 破裂方向确定) 时场点地震动超越 a 的概率, $f(\theta)$ 为破裂方向的概率密度函数。

④ 假定共有 N_z 个地震带对场点有影响, 则综合所有地震带的影响得:

$$P(A \geq a) = 1 - \prod_{k=1}^{N_z} (1 - P_k(A \geq a)) \quad (4.1.5)$$

下文就本次地震危险性概率分析各环节所需参数的确定进行论述, 并根据本次工作所得到的计算参数, 给出工程场地的地震危险性概率分析结果。其中地震带划分在前面有关章节已经论述, 这里将仅就研究区域内潜在震源区划分、地震带及潜在震源区地震活动性参数的确定进行详细论述。

4. 2 潜在震源区的划分

本次工作潜在震源区划分, 是在新编“中国地震动参数区划图”(2015)中国地震局地球物理研究所潜在震源区划分方案的基础上, 结合前述区域及近场区地震构造条件的研究成果, 最终确定的。

4. 2. 1 潜在震源区划分的原则和方法

潜在震源区划分的原则可概括为历史地震重演和构造类比两条基本原则。

历史地震重演原则, 是认为历史上发生过大地震的地方, 将来还可能发生类似的地震。构造类比原则, 是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。

本次工作中潜在震源区的划分原则, 着重考虑了以下几点:

① 区域地震构造格局对地震的控制作用。区域内地震活动多受北东—北北东向及北西向两组构造的控制, 表现出沿这两组方向的条带分布。但在这两组构造中, 北东—北北东向构造起主要的控制作用, 发生地震强度较大, 且极震区长轴方向通常都为北东—北北东; 北西向构造的存在, 使两者交汇部位易于积累应力发生地震, 沿北西向断裂发生的地震强度也相对较小。基于此认识, 区域内划分的高震级潜在震源区多为北东—北北东。

② 第四纪活动断裂及其活动性差异分段。区域内大多数第四纪活动断裂不同的段落具有不同的构造活动性。在晚更新世、甚至全新世以来有过活动的断裂段，多有 6 级以上地震发生。第四纪早期活动的断裂段，地震活动多在 4~5 级。区域地震活动与断裂活动性的关系密切，是潜在震源区震级上限确定的重要依据。

③ 不同方向断裂构造的交汇部位。区域内主要构造方向为北东—北北东向与北西—北西向。这两组方向的断裂交汇的部位，是构造应力易于集中的地方，也是大震、强震易于发生的部位。

④ 地球物理场的畸变、转折部位或梯度带等特征与浅部构造的耦合部位。这些部位往往是构造深部背景的反映。

⑤ 新构造时期的断陷盆地是本区域重要的活动构造形式，区内的许多破坏性地震的发生与这些断陷盆地相关。强震常常发生在断陷盆地内某些特殊的构造部位上。

⑥ 历史地震的空间分布及其现代小地震活动的空间分布，是区域潜在震源区确定的重要基础依据。

基于以上原则，在第四代地震动参数区划图潜在震源划分综合方案的基础上，依照新一代全国地震动参数区划图潜在震源划分方案对本地区潜在震源区划分进行了修订，形成了本次工作地震危险性分析中所使用的潜在震源区划分方案，详述如下。

4. 2. 2 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，通常分为 5.5, 6.0, 6.5, 7.0, 7.5, 8.0 和 8.5 级等几个震级段。

1. 震级上限的确定依据

本报告潜在震源区划分中，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，由于有地震记载的历史年代不够长，缺失和遗漏都在所难免，因此，历史上记载到的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。在有可靠古地震资料的地方，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) 地质构造依据

根据目前我国地震构造研究的状况，在确定发震构造所能产生的最大地震时，重点考虑活动断层的方向、性质以及构造规模与断层上发生地震最大震级的控制作用。

2. 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。且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根据。

4. 2. 3 各震级档潜在震源区边界的确定

本项工作采用高震级档和低震级档两级划分方式，在较宽的低震级档潜源上叠加较窄的高震级档潜源区。高震级档包括上限 8、7.5、7 和 6.5 各震级段，低震级档包括上限 6 级及 5.5 震级段，其边界的确定原则如下：

1. 高震级档

在确定潜在震源区范围时，考虑到高震级档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档潜在震源区应尽可能划小，勾划出未来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. 低震级档

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 级以下地震的低震级地震的区域，或高震级档潜源的外围地区、发生过 5 级左右地震和小震密集区，划为低震级档潜源区。该档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空间位置预测上的不确定性。

由于 6.0 级以下地震的分布具有相当的离散性，它们往往在断裂两侧 10~30km 的

范围内也有分布，这个范围往往也是小震密集带，故本区大部分发震构造带两侧 10~30km 的区域都划为震级上限为 6 级的低震级档潜在震源区。

4. 2. 4 潜在震源区划分结果

通过地震地质和地震活动性的研究，按照潜在震源区划分的原则，对区域内的潜在震源进行了划分，现将本区内对场址影响较大的潜在震源区的划分依据叙述如下：（图 4.2.1）。

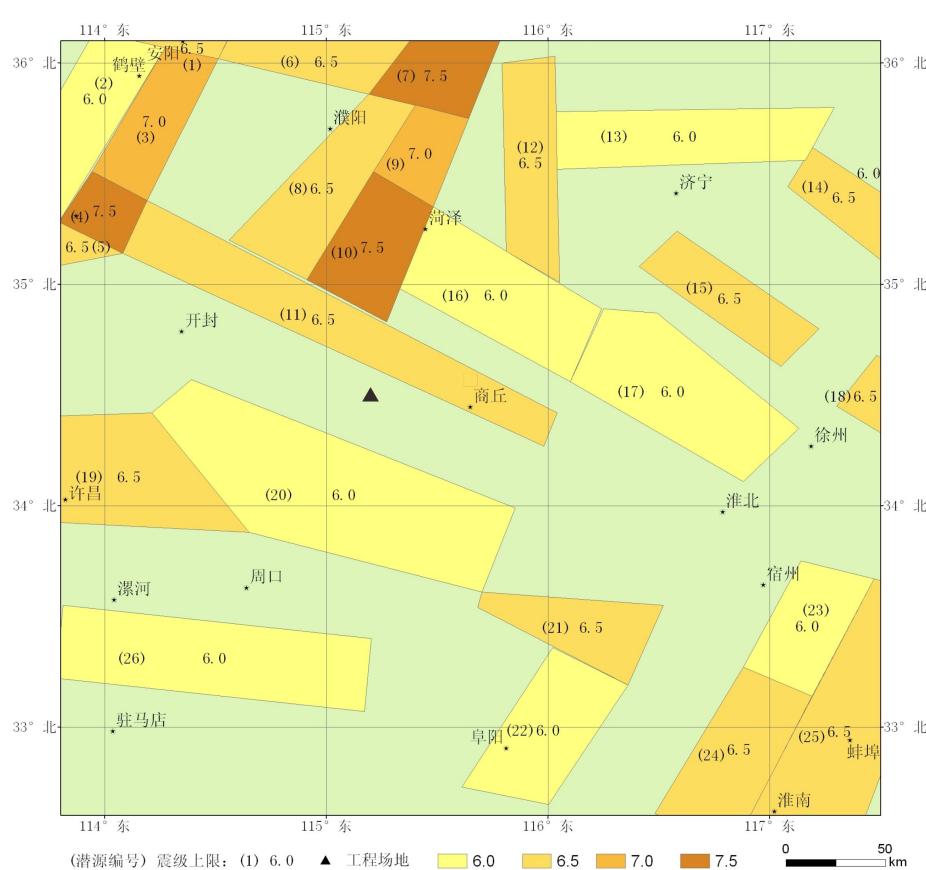


图 4.2.1 区域潜在震源区分布图

对场地影响较大的几个潜在震源区特征简述如下：

1) 商丘潜在震源区 (11)

商丘潜在震源区位于河北平原地震带南端。新乡—商丘断裂纵贯全区为主要断裂，还有一系列北北东—北东向断裂在源内与主断裂交汇，而且它们大都属第四纪活动断裂。重力和磁异常存在北西向梯级带。区内 1737 年发生一次封丘 $5\frac{1}{2}$ 地震。该潜在震源区的震级上限定为 6.5 级。

2) 菏泽潜在震源区 (10)

该潜在震源区包括东明坳陷南段及菏泽隆起，属华北平原地震带。区内主要发育

北北东向的兰聊断裂和近东西向的菏泽断裂及兗山断裂，这两组断裂在该区交汇。聊兰断裂和菏泽断裂均为第四纪活动断裂，是强震多发地区。1937年菏泽7级和 $6\frac{3}{4}$ 级两次地震以及1948年菏泽 $5\frac{1}{2}$ 级地震和1983年菏泽6.0级地震就发生在区内。该潜在震源区的震级上限定为7.5级。

3) 新乡潜在震源区 (4)

该潜在震源区位于汤阴地堑南段，地堑西侧为北北东向的汤西断裂、东为与之平行的汤东断裂，规模较大的东西向盘古寺—新乡断裂和北北西向新乡—商丘断裂与上述两条断裂在本潜源区内交汇。野外探槽表明，汤东断裂晚更新世有活动，据物探、钻探及地貌分析，汤阴地堑自古近纪—第四纪存在不同程度的垂直或水平运动。该潜在震源区存在7级以上大震的构造条件，震级上限定为7.5级。

4) 范县潜在震源区 (7)

主体位于北北东向聊兰断裂与北西西向大名断裂的交汇部位。聊兰断裂在大名断裂以南的断裂段，浅层地震和钻孔揭示最新影响到全新世早期地层。大名断裂，据钻孔资料最新影响到中更新统。区内历史上发生过山东朝城1654年 $5\frac{1}{2}$ 级地震。该潜在震源区的震级上限定为7.5级。

4. 3 地震活动性参数的确定

目前反映地震活动的空间不均匀性，地震活动性参数按两级确定。第一级为地震带活动性参数，它反映不同地区孕震条件和地震时、空活动特征的差异；第二级是地震带内各个潜在震源区的参数，反映地震带内地震活动的空间非均匀性。

4. 3. 1 地震带活动性参数的确定

1. 震级上限 M_{uz} 和起算震级 M_0 的确定

震级上限 M_{uz} 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 M_{uz} 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，可按该带内发生过的最大地震强度确定 M_{uz} ；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，且遵从地震带的震级上限 M_{uz} 应等于带内各潜在震源区震级上限 (M_u) 的最大值这一原则，即 $M_{uz}=(M_u)_{max}$ 。因此有：

华北平原地震带： $M_{uz}=8.0$ ；郯庐地震带： $M_{uz}=8.5$ 。

起算震级 M_0 系指对工程场地有影响的最小震级，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，故在本研究中 M_0 取 4 级。

2. 各地震带 b 值和 ν_4 的确定

b 值依据古登堡—里克特所定义的震级频度关系式 $\lg N = a - bM$ ，由实际地震数据统计确定。式中 a 、 b 为常系数， N 为震级大于等于 M 的地震个数。由于 b 值是在实际地震资料统计的基础上获得，它与资料的可靠性、完整性、取样时空范围、样本起始震级、震级间隔等因素有关。

ν_4 是地震带（地震统计区）4.0 级以上地震的年发生次数，即 4.0 级以上地震的年平均发生率。从概率角度来说， ν_4 代表地震带（地震统计区）年 4.0 级以上地震次数随机变量的泊松期望值。

本次工作中采用了新一代全国地震动参数区划图编制中确定 b 值和 ν_4 的方法，在不同方案进行统计分析后确定的 b 值和 ν_4 作为初值的基础上，根据地震带（地震统计区）内实际地震的发生率、地震带（地震统计区）未来地震活动趋势分析结果、1970 年以来近 40 年的仪器记录地震资料所反映的中强地震发生次数的分布特点等因素，并基于对未来地震危险性给予合理保守考虑的原则，进行必要的调整，最终确定地震统计区 ν_4 与 b 值的结果。本次工作最终使用的 b 和 ν_4 数值，直接采用了新一代全国地震动参数区划图编制中确定 b 值和 ν_4 的结果。

(1) 华北平原地震带自 1484 年 $M \geq 5.0$ 级地震记录基本完整，1950 年以来 $M \geq 4.0$ 级地震记录较全。公元 1485 和公元 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。对 ν_4 与 b 值进行调整，重点考虑以下控制：

- ① $M \geq 4.0$ 地震年发生率应大致相当 1950 年以来地震活动水平；
- ② $M \geq 5.0$ 级地震年发生率应大致相当 1484 年、1791 年以来地震活动水平；
- ③ 较大震级发生率应重点考虑 1484 年以来地震活动情况；

经调整，确定华北平原地震地震带地震活动性参数为 $b=0.82$ ， $\nu_4=4.6$ 。图 4.3.1 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 、 ν_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。

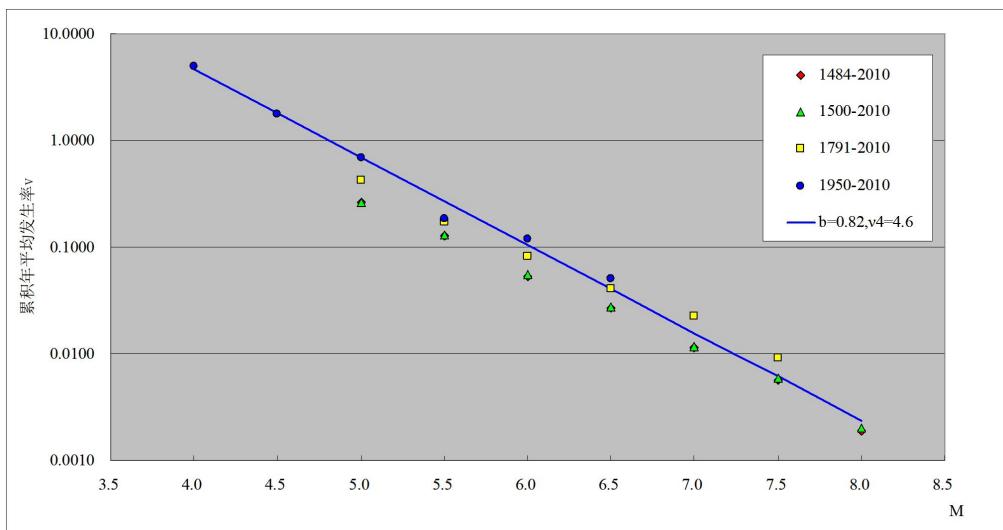


图 4.3.1 华北平原地震统计区各时段实际统计与理论结果对比

(2) 郊庐地震带发生过著名的 1668 年郊城 $8\frac{1}{2}$ 级特大地震。该区地震记载最早始于公元前 70 年，但公元 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， $M \geq 5.0$ 级地震发生较为平稳，1970 年以来 4 级以上地震记录较全。公元 1477 和公元 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。对 v_4 与 b 值进行调整，重点考虑以下控制：

- ① $M 4$ 级以上地震年发生率应大致相当 1970 年以来地震活动水平；
- ② $M 5$ 级以上地震年发生率应不低估 1477 年、1829 年以来地震活动水平；
- ③ 较大震级发生率应重点考虑 1500 年以来地震活动情况；

经调整，确定郊庐地震统计区地震活动性参数为 $b=0.85$ ， $v_4=4.0$ 。图 4.3.2 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，与 1970 年以来的水平大致相当；在中强震级段与活跃期地震活动水平相当；而在高震级段，基本与 1500 年以来活动水平相当，考虑到这一时期发生过多次 7 级以上地震，因此，发生率应该具有一定的保守性。

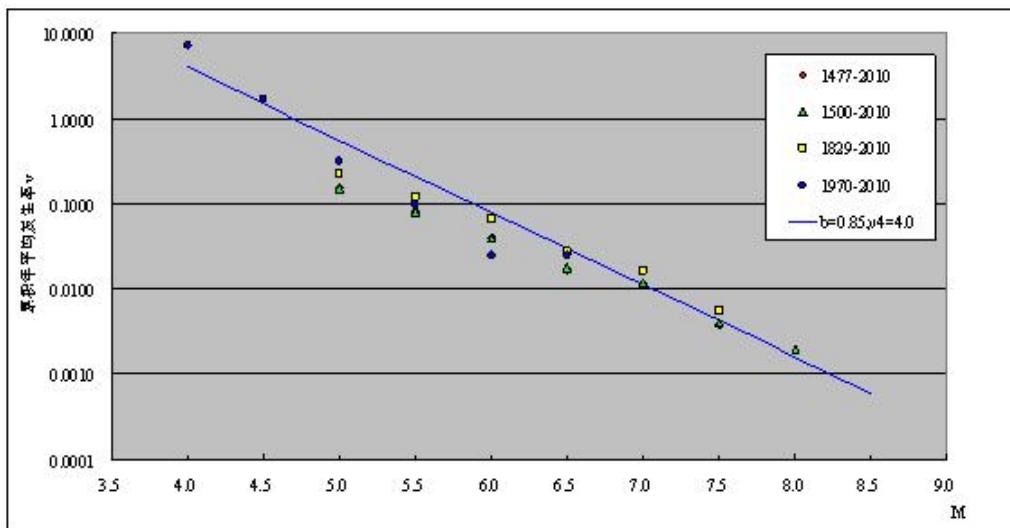


图 4.3.2 郊庐地震统计区各时段实际统计与理论结果对比

表 4.3.1 地震带地震活动性参数

地震带	震级上限	b	V_4
华北平原地震带	8.0	0.82	4.6
郊庐地震带	8.5	0.85	4.0

4.3.2 确定潜在震源区的地震活动性参数

1. 潜在震源区的震级上限 M_u

潜在震源区的震级上限 M_u 是指该潜在震源区内可能发生的最大震级，并预期未来发生超过该震级的概率趋于 0，潜在震源区的震级上限主要由该潜在震源区本身的地震活动性和地质构造特点来确定。

2. 空间分布函数 f_{i,m_j}

空间分布函数 f_{i,m_j} 是一个地震带内发生的 m_j 档震级的地震落在第 i 个潜在震源区内的概率。在同一地震带内 f_{i,m_j} 满足归一条件：

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

这里 n 为地震带内第 m_j 档潜在震源区的总数。

确定空间分布函数时，主要通过多因子加权综合评定的方法加以确定。

对 6 级以下的低档潜在震源区，主要考虑的因子是小地震空间分布密度。对 6.5 级以上的高档潜在震源区，主要考虑的影响因子包括：①长期地震活动背景；②具备发生 7 级以上地震的构造上的空段；③中国东部和中部 8 级大震减震效应；④潜在震源的可靠程度。

本次工作分不同地震区带计算出带内潜在震源区各自的空间分布函数。在区域内

涉及的 20 个潜在震源区中, 工程场地沿线附近主要的 4 个潜在震源区的地震活动性参数列于表 4.3.2。

表 4.3.2 区域几个主要潜在震源区地震活动性参数

震级档 m_j 潜源编号	4.0~5.4	5.5~5.9	6.0~6.4	6.5~6.9	7.0~7.4	≥ 7.5	M_u	θ_1 (度)	P_1	θ_2 (度)	P_2
商丘	0.0240	0.0248	0.0254	0.0000	0.0000	0.0000	6.5	120	1.0	0.0	0.0
菏泽	0.0154	0.01623	0.0150	0.0426	0.06410	0.0000	7.5	30	0.7	120	0.3
新乡	0.0112	0.0120	0.0856	0.1983	0.2828	0.0000	7.5	25	0.7	115	0.3
范县	0.0138	0.0146	0.0275	0.1064	0.1261	0.0000	7.5	25	0.7	110	0.3

注: M_u 为各潜在震源区的上限; θ_1 、 θ_2 为等震线长轴取向角度; P_1 、 P_2 为相应分布概率。

3. 方向性函数

目前在我国地震危险性分析的衰减模型通常采用椭圆衰减模型, 而等震线的长轴取向则因地而异。一个地区等震线长轴的取向主要来源于对该地区地震等震线几何形状的统计研究。根据对研究区等震线长轴取向的分析结果, 绝大部分 6 级以上地震的极震区长轴走向与区域活动断裂带的走向一致。因此, 可按区域构造走向来预测未来地震等震线长轴走向。

4.4 地震动衰减关系

地震动衰减关系是地震危险性分析中的重要环节。由于地震动衰减与震源错动性质、地震波传播路径和局部场地条件有关, 因而地震动衰减关系具有明显的地区特点。

本项工作所使用的长周期反应谱衰减关系为俞言祥 (2002) 得到的我国东部地区加速度反应谱衰减关系。在建立本项目使用的衰减关系时, 使用了具有可靠长周期信息的数字宽频带记录作为数据而统计得出参考地区的地震动衰减关系的长周期部分 (俞言祥, 2002), 而周期小于 1.7 秒的短周期部分, 则采用了传统的模拟式强震记录统计得到的衰减关系。参考地区的烈度衰减关系则采用了 Chandra 的结果 (Chandra, 1979), 而本地区的烈度衰减关系则为中国东部地区的地震烈度衰减关系 (汪素云等, 2000)。采用胡聿贤等 (1984) 提出的转换方法得到了中国东部地区的反应谱衰减关系。

基岩地震动水平向峰值加速度和反应谱衰减关系的形式为:

$$\lg A = C_1 + C_2 M + C_3 M^2 - C_4 \lg(R + C_5 e^{C_6 M}) \quad (4.4-1)$$

式中, A 为峰值加速度或反应谱值, M 为震级, R 为震中距。式中周期小于 6s 的长轴和短轴衰减关系系数如表 4.4-1 和表 4.4-2 所示, σ 为衰减关系各周期的标准差。

图 4.4-1 和图 4.4-2 分别为水平向基岩加速度峰值衰减关系和加速度反应谱衰减关系图。

表 4.4-1 基岩地震动水平向峰值加速度和反应谱的衰减关系(长轴) (俞言祥)

周期	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	σ
PGA	2.027	.548	.000	-1.902	1.700	.425	0.240
.040	2.115	.539	.000	-1.907	1.700	.425	0.225
.050	2.139	.540	.000	-1.912	1.700	.425	0.223
.070	2.296	.538	.000	-1.957	1.700	.425	0.224
.100	2.575	.526	.000	-2.004	1.700	.425	0.229
.120	2.525	.533	.000	-1.979	1.700	.425	0.242
.140	2.526	.538	.000	-1.979	1.700	.425	0.253
.160	2.511	.548	.000	-1.990	1.700	.425	0.245
.180	2.407	.559	.000	-1.969	1.700	.425	0.248
.200	2.322	.555	.000	-1.901	1.700	.425	0.261
.240	2.163	.562	.000	-1.845	1.700	.425	0.260
.260	2.125	.572	.000	-1.865	1.700	.425	0.263
.300	2.196	.547	.000	-1.823	1.700	.425	0.282
.340	2.096	.574	.000	-1.855	1.700	.425	0.309
.360	2.022	.579	.000	-1.839	1.700	.425	0.320
.400	1.876	.591	.000	-1.820	1.700	.425	0.325
.440	1.716	.600	.000	-1.784	1.700	.425	0.333
.500	1.433	.635	.000	-1.786	1.700	.425	0.338
.600	1.108	.649	.000	-1.698	1.700	.425	0.357
.700	.849	.697	.000	-1.755	1.700	.425	0.372
.800	.709	.705	.000	-1.740	1.700	.425	0.380
1.000	.375	.747	.000	-1.753	1.700	.425	0.388
1.200	.216	.760	.000	-1.766	1.700	.425	0.381
1.500	-.319	.824	.000	-1.794	1.700	.425	0.336
1.700	-.534	.833	.000	-1.753	1.700	.425	0.330
2.000	-.749	.834	.000	-1.700	1.700	.425	0.327
2.400	-1.008	.857	.000	-1.700	1.700	.425	0.322
3.000	-1.327	.882	.000	-1.697	1.700	.425	0.306
4.000	-1.531	.901	.000	-1.726	1.700	.425	0.307
5.000	-1.858	.913	.000	-1.673	1.700	.425	0.324
6.000	-2.127	.924	.000	-1.631	1.700	.425	0.328

表 4.4-2 基岩地震动水平向峰值加速度和反应谱的衰减关系(短轴) (俞言祥)

周期	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	σ
PGA	1.035	.519	.000	-1.465	.381	.525	0.240
.040	1.120	.510	.000	-1.468	.381	.525	0.225
.050	1.142	.511	.000	-1.472	.381	.525	0.223
.070	1.275	.509	.000	-1.507	.381	.525	0.224
.100	1.530	.496	.000	-1.543	.381	.525	0.229
.120	1.493	.503	.000	-1.524	.381	.525	0.242
.140	1.494	.508	.000	-1.524	.381	.525	0.253
.160	1.474	.518	.000	-1.532	.381	.525	0.245
.180	1.381	.530	.000	-1.516	.381	.525	0.248
.200	1.331	.526	.000	-1.464	.381	.525	0.261
.240	1.200	.535	.000	-1.421	.381	.525	0.260
.260	1.153	.544	.000	-1.436	.381	.525	0.263
.300	1.245	.520	.000	-1.404	.381	.525	0.282
.340	1.128	.546	.000	-1.428	.381	.525	0.309
.360	1.063	.552	.000	-1.416	.381	.525	0.320
.400	.927	.564	.000	-1.401	.381	.525	0.325
.440	.786	.573	.000	-1.374	.381	.525	0.333
.500	.501	.608	.000	-1.375	.381	.525	0.338
.600	.222	.624	.000	-1.307	.381	.525	0.357
.700	-.066	.671	.000	-1.351	.381	.525	0.372
.800	-.199	.679	.000	-1.339	.381	.525	0.380
1.000	-.539	.720	.000	-1.349	.381	.525	0.388
1.200	-.706	.734	.000	-1.359	.381	.525	0.381
1.500	-1.255	.798	.000	-1.380	.381	.525	0.336
1.700	-1.449	.807	.000	-1.349	.381	.525	0.330
2.000	-1.636	.809	.000	-1.308	.381	.525	0.327
2.400	-1.895	.831	.000	-1.308	.381	.525	0.322
3.000	-2.213	.857	.000	-1.306	.381	.525	0.306
4.000	-2.432	.875	.000	-1.328	.381	.525	0.307
5.000	-2.731	.888	.000	-1.287	.381	.525	0.324
6.000	-2.979	.899	.000	-1.254	.381	.525	0.328

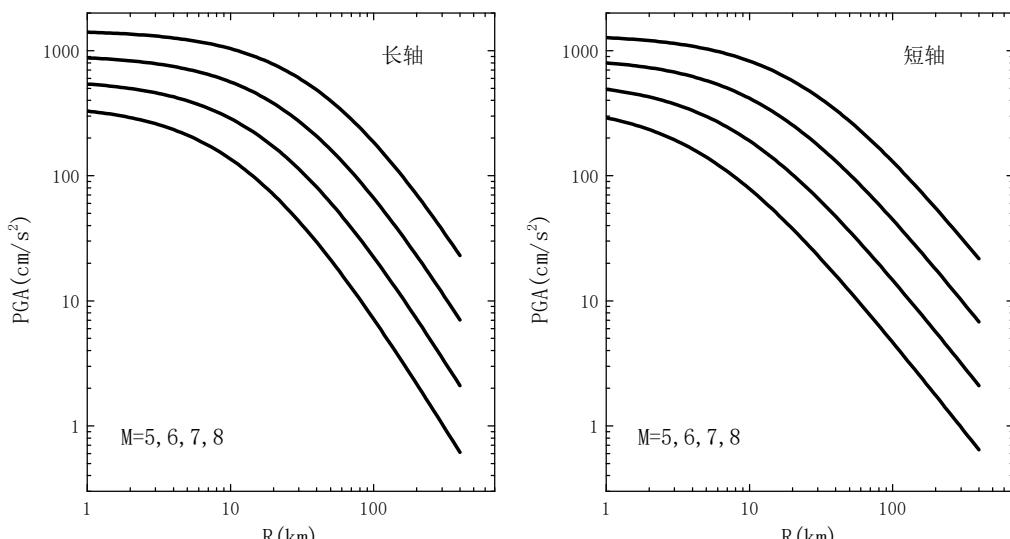


图 4.4-1 水平向基岩峰值加速度衰减关系图

4.5 目标区地震危险性分析结果

根据本章前几节研究确定的潜在震源区、地震活动性参数、地震动衰减关系，采用编制《中国地震动参数区划图(2015)》的计算程序（ESE），完成目标区的地震危险性分析计算。

4.5.1 基岩水平峰值加速度

采用基岩地震加速度峰值衰减关系，通过地震危险性概率分析计算，可以得到工程场地基岩水平加速度危险性分析结果。50年超越概率63%、10%和2%三种危险水平的基岩水平加速度峰值分别为：21.9gal、65.8gal、119.4 gal。基岩水平加速度超越概率曲线示于图 4.5.1。对场地基岩水平峰值加速度起主要贡献作用的潜源为菏泽、商丘潜在震源，其次为新乡、范县源等（见表 4.5.1）。场地建筑物的自振周期为2秒左右，周期2秒处基岩加速度各潜源贡献率如表 4.5.2 所示。表明场地基岩加速度主要受中场的强地震影响，这与工程场地所处的区域地震环境是一致的。

表 4.5.1 基岩峰值潜在震源区贡献

潜在震源	50 年超越概率 (%)		
	63%	10%	2%
菏泽源	23.6	58.2	100.0
商丘源	33.9	40.3	0
新乡源	18.8	0	0
范县源	15.4	0	0
其它	8.3	1.5	0

表 4.5.2 基岩 2 秒潜在震源区贡献

潜在震源	50 年超越概率 (%)		
	63%	10%	2%
菏泽源	22.6	35.3	61.4
新乡源	28.3	31.8	28.6
范县源	23.0	20.4	5.2
商丘源	19.6	10.6	2.8
其它	6.5	6.8	2.0

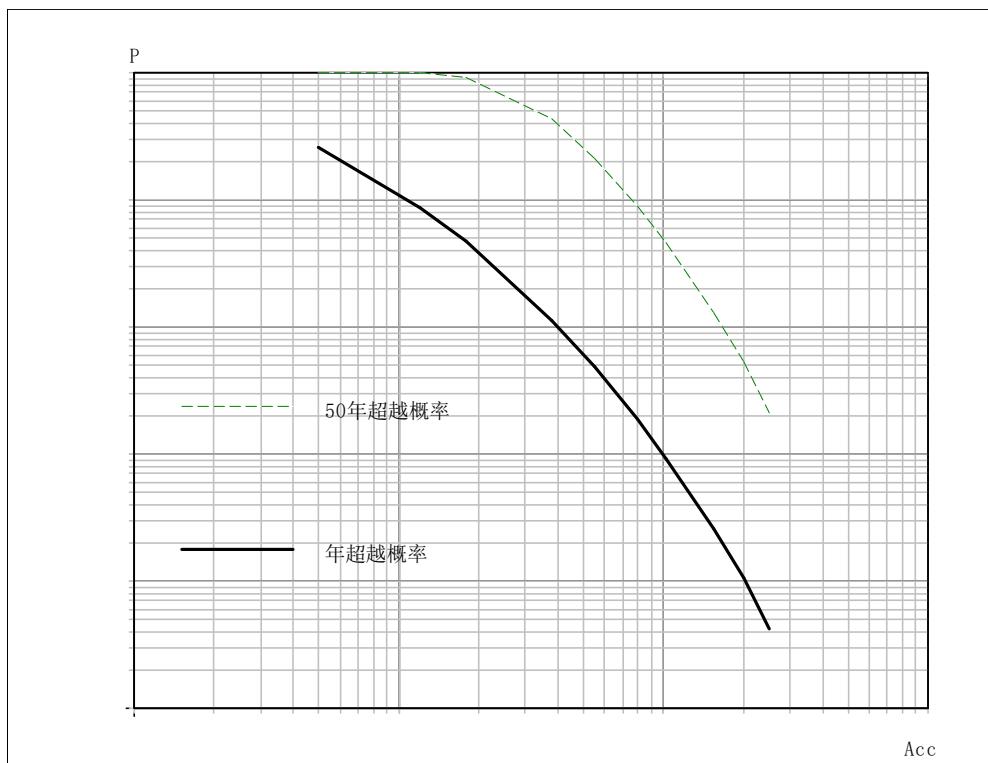


图4.5.1 基岩水平加速度超越概率曲线

4.5.2 基岩水平地震加速度反应谱

采用基岩水平地震加速度反应谱衰减关系，通过地震危险性概率分析对每个周期点进行计算，可以得到工程场地 50 年超越概率 63%、10% 和 2% 的基岩水平地震加速度反应谱（图 4.5.2，表 4.5.3）。

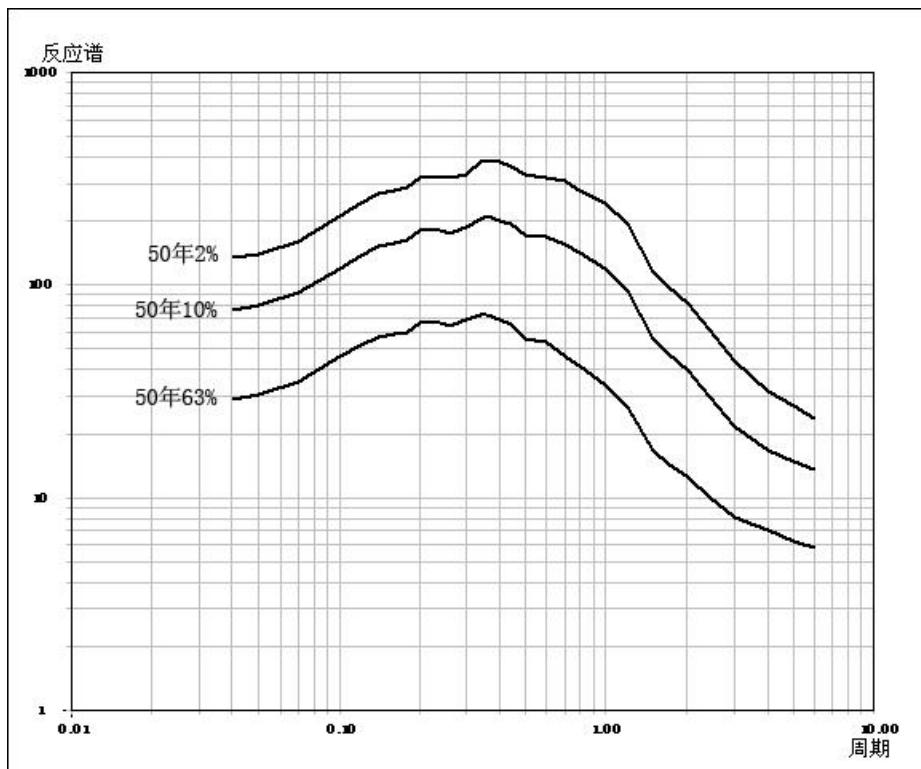


图 4.5.2 50年超越概率63%、10%和2%的基岩水平加速度反应谱

表 4.5.3 50 年超越概率基岩水平加速度反应谱值(ga1)

周期 (s)	不同超越概率加速度反应谱 (Ga1)			周期 (s)	不同超越概率加速度反应谱 (Ga1)		
	63%	10%	2%		63%	10%	2%
0.040	29.6	77.2	136.1	0.440	64.9	193.3	364.0
0.050	31.0	80.8	140.8	0.500	55.3	171.6	328.0
0.070	34.9	91.9	162.0	0.600	53.2	169.4	328.0
0.100	45.9	121.1	212.7	0.700	45.8	154.2	304.0
0.120	51.4	137.8	243.1	0.800	41.1	140.5	282.8
0.140	56.4	152.6	271.9	1.000	33.5	119.9	248.7
0.160	58.3	158.4	284.5	1.200	26.5	92.7	192.6
0.180	59.7	163.7	292.0	1.500	16.5	55.5	116.2
0.200	66.3	179.8	328.0	1.700	14.5	47.3	97.5
0.240	67.1	181.4	328.0	2.000	12.0	38.2	78.6
0.260	64.2	176.4	316.0	2.400	9.9	30.6	62.8
0.300	68.6	186.3	340.0	3.000	8.1	21.0	41.5
0.340	72.4	206.1	376.0	4.000	7.0	16.7	31.9
0.360	73.4	211.3	388.0	5.000	6.1	14.9	27.1
0.400	68.4	200.3	376.0	6.000	5.8	13.3	23.4

5 场地工程地震地质条件

场地地震工程地质条件勘测是为进行场地地震动参数计算和地震地质灾害评估提供资料和数据。根据工程场地的实际情况，共布置了 50 口钻孔进行了剪切波速测试。在综合分析钻探、测试资料基础上对场地工程地震条件进行了综合评价，对场地地震地质灾害进行了评估。

5.1 场地地形地貌

拟建工程场地所处地貌类型为黄河冲积平原，场地地形平坦。

5.2 岩土构成与特征

根据钻探结果，结合室内土工试验资料，对地基土按岩性及力学特征分层后，对场地钻孔勘探地质分层分述如下：

第 1 层粉质粘土：灰褐色，可塑，局部夹有粉土，可见螺壳碎片及少量钙质结核。

第 2 层粉土：褐黄色，湿，稍密，夹粉质粘土薄层，上部 90cm 素填土。

第 3 层粉质粘土：灰色，可塑，含钙核，夹粉土薄层。

第 4 层粉土：褐黄色，很湿，密实，夹细砂。

第 4-1 层细砂：褐黄色，饱和，密实。

第 5 层粉质粘土：棕黄色，可塑，局部夹粉土，含铁锰质斑点。

第 6 层细砂：褐黄色，饱和，密实。

第 6-1 层粉土：褐黄色，湿，密实。

第 7 层粉质粘土：灰青色，硬塑，含较多钙质结核、姜石，见蜗牛壳。

第 8 层细砂：褐黄色，饱和，密实，夹有粉质粘土。

第 8-1 层粉土：褐黄色，湿，密实。

第 9 层粉质粘土：褐黄色，硬塑，坚硬，含较多钙质结核及灰绿色染纹。

第 10 层细砂：褐黄色，饱和，密实，夹有粉质粘土。

5.3 波速测试和场地类别

5.3.1 工作原理

本工程场地波速测试采用单孔检层法进行，其原理是：在场地地面上距离钻孔一定距离置一木板，作为激振板，板的底面和地面紧密接触，在木板压重物，然后用铁锤

敲击木板一端，使木板与地面产生剪切力，激起土层振动，该振动波通过井下的三分向检波器接收以此得到所需数据。

本工程场地钻孔观测点布置，以钻孔分层为依据，点距为2m，保证每个地质分层不少于一个测点，每个测点采用水平激振，以此得到横波信号。

5. 3. 2 测试仪器

1. SR-SW一体机（内置工控机、可独立工作）

主控系统：工控机 500MHz/512M；操作方式：触摸屏；操作系统：Windows；
整机带宽：0.1~2kHz；通道数：4道；放大倍数 1~10 万倍；采样间隔 $5 \mu s \sim 10000 \mu s$ ；记录长度：0.5k、1k、2k、4k、8k 五档可调。

2. 井下三分量检波器（CDJ-DJ38型）：自振频率 $35 \pm 2Hz$ ；通频带 $38 \sim 180Hz$ ； 电压灵敏度：0.26v/cm/s。

5. 3. 3 土层剪切波速测试结果

目标区代表个钻孔的土层剪切波速测试结果见表 5. 3. 1 至表 5. 3. 4。

表 5.3.1 zk1 孔钻孔柱状图及剪切波速测试结果

地层 编号	地层 年代	地层名称	层底 埋深 (m)	厚度 (m)	天然 密度 (g/cm ³)	钻孔 柱状图	测深 (m)	剪切 波速 (m/s)	Vs(m/s)					
									100	200	300	400	500	600
1		般质粘土	6.5	6.5	1.88		2	221						
2		土	9.2	2.7	1.90		4	195						
3		般质粘土	18.0	8.8	1.92		6	155						
4		土	31.0	13.0	1.95		8	143						
5		般质粘土	43.0	12.0	1.94		10	186						
6		细砂	47.2	4.2	2.00	X	12	198						
7		般质粘土	51.8	4.6	1.95		14	212						
8-1		土	56.0	4.2	1.97		16	243						
8		细砂	59.0	3.0	2.02	X	18	251						
8-1		土	65.0	6.0	2.01		20	259						
9		般质粘土	79.0	14.0	1.98		22	265						
10-1		土	81.0	2.0	2.04		24	280						
10		细砂	90.0	9.0	2.10	X	26	259						
							28	300						
							30	282						
							32	319						
							34	354						
							36	336						
							38	303						
							40	336						
							42	315						
							44	336						
							46	360						
							48	336						
							50	347						
							52	359						
							54	362						
							56	375						
							58	406						
							60	388						
							62	393						
							64	387						
							66	416						
							68	402						
							70	418						
							72	393						
							74	410						
							76	428						
							78	439						
							80	465						
							82	491						
							84	508						
							86	526						
							88	535						
							90							

表 5.3.2 zk2 孔钻孔柱状图及剪切波速测试结果

地层 编号	地层 年代	地层名称	层底 埋深 (m)	厚度 (m)	天然 密度 (g/cm³)	钻孔 柱状图	测试 深度 (m)	剪切 波速 (m/s)	Vs(m/s)					
									100	200	300	400	500	600
1		粉质粘土	7.5	7.5	1.87			2	197					
								4	180					
								6	149					
								8	172					
2		粉土	10.5	3.0	1.90			10	200					
								12	193					
3		粉质粘土	16.0	5.5	1.92			14	225					
								16	239					
								18	264					
								20	265					
4		粉土	32.0	16.0	1.95			22	284					
								24	265					
								26	280					
								28	315					
								30	296					
								32	333					
5		粉质粘土	43.3	11.3	1.94			34	336					
								36	296					
								38	311					
								40	315					
								42	312					
								44	340					
6		细砂	47.9	4.6	2.00			46	357					
								48	345					
7		粉质粘土	56.7	8.8	1.96			50	352					
								52	357					
								54	376					
								56	388					
								58	377					
								60	385					
8		细砂	58.3	1.6	2.03		X	62	379					
								64	388					
								66	380					
								68	396					
								70	420					
								72	436					
								74	420					
								76	455					
								78	473					
								80	460					
9		粉质粘土	79.0	20.7	1.98		X	82	510					
								84	527					
								86						
								88						
								90						
10		细砂	90.0	11.0	2.08		X							

表 5.3.3 zk3 孔钻孔柱状图及剪切波速测试结果

地层 编号	地层 年代	地层名称	层底 埋深 (m)	厚度 (m)	天然 密度 (g/cm³)	钻孔 柱状图	测点 深度 (m)	剪切 波速 (m/s)	Vs(m/s)					
									100	200	300	400	500	600
1		稍质粘土	3.5	3.5	1.87		2	168						
								4	132					
2		稍土	9.0	5.5	1.89		6	175						
								8	198					
3		稍质粘土	13.5	4.5	1.90		10	200						
								12	238					
4-1		细砂	16.8	3.3	1.99		14	239						
								16	246					
4		稍土	30.5	13.7	1.95		18	251						
								20	265					
5		稍质粘土	39.5	9.0	1.94		22	265						
								24	277					
6		细砂	46.0	6.5	2.01		26	296						
								28	265					
7		稍质粘土	55.0	9.0	1.96		30	309						
								32	286					
8-1		稍土	57.0	2.0	1.99		34	315						
								36	334					
9		稍质粘土	77.0	20.0	1.98		38	315						
								40	357					
10		细砂	90.0	13.0	2.08		42	338						
								44	356					
							46	345						
								48	361					
							50	370						
								52	381					
							54	367						
								56	378					
							58	374						
								60	380					
							62	391						
								64	412					
							66	396						
								68	420					
							70	411						
								72	385					
							74	413						
								76	462					
							78	455						
								80	471					
							82	483						
								84	516					
							86	528						

表 5.3.4 zk4 孔钻孔柱状图及剪切波速测试结果

地层 编号	地层 年代	地层名称	层底 埋深 (m)	厚度 (m)	天然 密度 (g/cm ³)	钻孔 柱状图	测试 深度 (m)	剪切 波速 (m/s)	Vs(m/s)					
									100	200	300	400	500	600
1		粉质粘土	5.0	5.0	1.86				2	158				
									4	149				
									6	196				
									8	207				
2		粉土	9.7	4.7	1.88				10	195				
									12	217				
									14	241				
									16	259				
3		粉质粘土	16.5	6.8	1.91				18	262				
									20	246				
									22	265				
									24	280				
4		粉土	30.0	13.5	1.94				26	271				
									28	252				
									30	296				
									32	328				
5		粉质粘土	35.0	5.0	1.94				34	347				
									36	310				
									38	295				
									40	336				
6-1		粉土	46.0	11.0	1.96				42	340				
									44	322				
									46	361				
									48	348				
7		粉质粘土	54.0	8.0	1.97				50	366				
									52	370				
									54	365				
									56	385				
8-1		粉土	57.0	3.0	1.99				58	392				
									60	421				
									62	416				
									64	385				
9		粉质粘土	76.5	19.5	1.98				66	386				
									68	391				
									70	396				
									72	419				
10		砂	90.0	13.5	2.09				74	428				
									76	432				
									78	440				
									80	461				
									82	513				
									84	518				
									86	541				
									88					
									90					

5.3.4 场地土类型、建筑场地类别确定

根据钻孔波速测试结果和工程勘察资料，依照《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)规定，对50个孔的场地综合判定。

按《建筑抗震设计规范》（GB50011-2010）规定，工程场地土类型为中软场地土，建筑场地类别为Ⅲ类。

5.4 场地土动力学参数测定

剪切模量与剪应变关系，阻尼比与剪应变关系，是场地土动力性质的主要部分，是地震反应分析模型建立的基本参数。本报告粉土（50米以上）、粉质粘土动力学参数采用河南华水工程质量检测有限公司提供的土动力学参数，粉土（50米以下）和细砂的土动力学参数采用中国地震局行业标准提供的值（表6.1.1）。

5.5 场地地震地质灾害评价

地震地质灾害指的是在地震作用下，地质体遭到破坏而引起的地质灾害，如软土震陷、崩塌和滑坡、砂土液化和活动断裂等灾害。本节根据工程场地的工程地质条件和地震危险性分析的结果，分析场地在遭受基本烈度的地震作用时可能出现的地震灾害类型。

5.5.1 软土震陷

对于软土震陷量的评价，《建筑抗震设计规范》（GB50011-2010）第4.3.11条的条文说明认为，对Ⅶ度区，当地基静承载力特征值 $f_{ak} > 70\text{kPa}$ 时，可不考虑软土震陷的影响。根据《岩土工程勘察规范》（GB50021-2001）（2009年版）条文说明表5.5，当抗震设防烈度为Ⅶ度， $f_a > 80\text{kPa}$ 或等效剪切波速 $v_{se} > 90\text{m/s}$ 时，可不考虑震陷影响。根据以上综合分析，本场地地基土可不考虑震陷影响。

5.5.2 崩塌与滑坡

工程场地所处地貌单元为黄河冲积平原，场地内地形平坦，在遭遇地震基本烈度（Ⅶ度）影响的地震时，不会产生地震崩塌、滑坡地震地质灾害。

5.5.3 砂土液化

场地位于地震烈度Ⅵ度区。根据本项目钻孔资料，工程场地地下20米深度范围内存在易液化的粉土和细砂层，根据《建筑抗震设计规范》（GB50011-2010）规定，工程场地采用标准贯入法进行了液化判别，判别结果见表5.5.1。

表 5.5.1 工程场地液化判别结果

孔号	层号	试验深度(m)	岩土名称	地下水位d _w (m)	实测击数N(击)	临界击数N _{cr} (击)	液化判别	液化指数I _{LEi}	液化指数I _{LE}	液化等级
4	2	5.15-5.45	粉土	1.00	5.0	7.1	液化	2.89	3.97	轻微
	2	6.15-6.45	粉土	1.00	14.0	8.4	不液化			
	2	7.15-7.45	粉土	1.00	12.0	8.1	不液化			
	2	8.15-8.45	粉土	1.00	7.0	8.1	液化	1.08		
	2	9.15-9.45	粉土	1.00	9.0	8.8	不液化			
	4	16.65-16.95	粉土	1.00	37.0	15.5	不液化			
	4	17.65-17.95	粉土	1.00	30.0	16.0	不液化			
	4	19.65-19.95	粉土	1.00	20.0	16.6	不液化			
3	1	3.55-3.85	粉土	1.00	4.0	0.0	不液化		2.65	轻微
	2	4.55-4.85	粉土	1.00	5.0	5.9	液化	1.53		
	2	5.55-5.85	粉土	1.00	4.0	0.0	不液化			
	2	6.55-6.85	粉土	1.00	9.0	9.1	液化	1.12		
	2	7.55-7.85	粉土	1.00	13.0	7.1	不液化			
	2	8.55-8.85	粉土	1.00	16.0	12.6	不液化			
	4	13.65-13.95	细砂	1.00	23.0	14.6	不液化			
	4	14.65-14.95	细砂	1.00	25.0	15.8	不液化			
	4	15.65-15.95	细砂	1.00	27.0	16.2	不液化			
	4	16.15-16.45	细砂	1.00	36.0	15.5	不液化			
	4	17.65-17.95	粉土	1.00	27.0	16.0	不液化			
	4	19.65-19.95	粉土	1.00	21.0	16.6	不液化			
2	2	7.55-7.85	粉土	1.00	6.0	8.0	液化	2.51	2.51	轻微
	2	9.15-9.45	粉土	1.00	15.0	0.0	不液化			
	2	10.15-10.45	粉土	1.00	12.0	11.3	不液化			
	4	16.15-16.45	粉土	1.00	20.0	15.5	不液化			
	4	17.65-17.95	粉土	1.00	18.0	16.0	不液化			
	4	19.65-19.95	粉土	1.00	19.0	16.6	不液化			
1	2	6.55-6.85	粉土	1.00	6.0	7.9	液化	2.58	3.64	轻微
	2	7.55-7.85	粉土	1.00	8.0	11.8	液化	1.06		
	2	8.55-8.85	粉土	1.00	12.0	9.4	不液化			
	4	18.65-18.95	粉土	1.00	18.0	15.9	不液化			
	4	19.65-19.95	粉土	1.00	18.0	15.9	不液化			

5.5.4 活动断裂

场地位于地震烈度VI度区。根据近场区地震构造研究结果，场址内无全新世以来的发震断裂通过。根据 GB50011—2010《建筑抗震设计规范》中第 4.1.7 条规定，可不考虑发震断裂错动对工程场地的影响。

6 工程场地地震动参数确定

6.1 数学模型的选用

地震时震源的震动能量是以波动形式向外传播的，地震过程实质上就是一个波动过程。地震震源产生的地震波首先传播至工程场地下部基岩，然后通过上覆土层到达地表，场地地震动效应除与场址所处的地震环境有关外，还取决于场地上覆土层的厚度及土层性状。不同的场地条件及不同的地震环境，场地的地震动效应存在很大差异。

场地地震动效应研究需在工程场地地震危险性分析基础上，根据工程场地土层静、动力特性参数原位测试和试验室试验结果，采用合适的波动模型进行场地地震反应分析。对水平成层的横向均匀土层，其波动问题的求解相对简单，目前已有许多行之有效的解析及数值方法。当场地存在局部不规则地形、局部地质构造以及土层介质横向不均匀性较大时，波在介质中的传播过程十分复杂，这类问题称为波的散射问题，其数学处理方法有两种：解析法及数值计算方法。由于所研究区域边界的复杂性及其介质的非均匀性，解析法的应用非常困难，在理论上至今还没有一种成熟的方法可直接应用。而数值法如有限元法（FEM）、有限差分法（FDM）及边界单元法（BEM）等，以其灵活、方便在工程中得到了广泛应用。

本工程场地位于太行山南侧山前冲洪积扇中部，场地内地势平坦，上覆土层水平成层分布，采用一维波动模型进行场地地震动效应研究具有足够的工程应用精度。

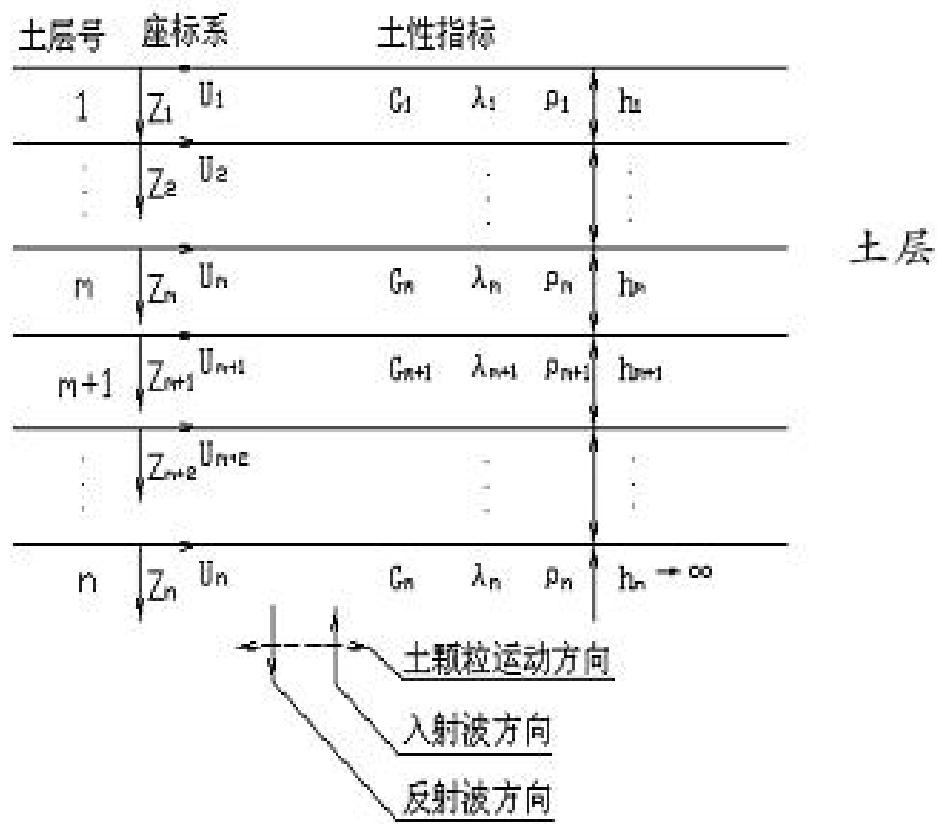
6.1.1 确定场地地震动参数的一维波动模型

目前，对水平成层的土层，通常采用一维波动模型并用等效线性化的方法考虑土体非线性特性的影响进行场地土层地震反应分析。

S波在图6.1.1体系中垂直向上传播时，满足一维波动方程：

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = S \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \eta \frac{\partial^3 u}{\partial z^2 \partial t} \quad (6-1)$$

式中： ρ - 质量密度； η - 粘滞阻尼系数； u - 位移； S - 土体刚度。



(a) S波垂直入射

图6.1.1 一维波动模型

当S波垂直入射时,水平成层的土层中仅产生水平向位移,S就是土的剪切模量G。

对频率为 ω 的谐波 $e^{i\omega t}$,方程(6-1)的解为:

$$u(z,t) = Ee^{i(Kz+\omega t)} + Fe^{-i(Kz-\omega t)} \quad (6-2)$$

其中: $K^2 = \frac{\rho \cdot \omega^2}{S^*}$; S^* 为复刚度, $S^* = S + i2\lambda G$; λ 为阻尼比。

式(6-2)适用于每一土层。式中第一项为向上的入射波,第二项为向下的反射波。

对第m土层及第m+1土层,在其界面处满足应力及位移连续条件。由此可得到入射波及反射波幅值的递推公式:

$$E_{m+1} = \frac{1}{2}(1 + \alpha_m)E_m e^{iK_m h_m} + \frac{1}{2}(1 - \alpha_m)F_m e^{-iK_m h_m} \quad (6-3)$$

$$F_{m+1} = \frac{1}{2}(1 - \alpha_m)E_m e^{iK_m h_m} + \frac{1}{2}(1 + \alpha_m)F_m e^{-iK_m h_m} \quad (6-4)$$

式中:

$$\alpha_m = \frac{K_m S_m^*}{K_{m+1} S_{m+1}^*} \quad (6-5)$$

第一层土入射波幅值及反射波幅值的关系可由地表处的应力条件确定。S波垂直入射时，土层表面的剪应力为零。由应力、应变的关系有：

$$\left. \frac{\partial u}{\partial z} \right|_{z=0} = 0 \quad (6-6)$$

将式(6-2)代入式(6-6)中，可得：

$$F_i = E_i \quad (6-7)$$

据此就可以计算各土层顶面的加速度时程和各土层中点的应变时程。

考虑土的非线性特性时采用等效线性化方法，按下述几个步骤进行。

①对各土层，首先假定初始应变 γ_m 或 ε_m 。

②由土层S波波速及其共振柱(动三轴)试验结果确定 S_m 或 λ_m 。

③计算各土层的稳态地震反应。

④在频域中计算各土层中点的等效应变 γ'_m 或 ε'_m ：

$$\gamma'_m \text{ (或 } \varepsilon'_m \text{)} = 0.65 \frac{\sum_{j=0}^{N/2} |\Gamma_{n,m}(\omega_j) A_j|^2}{\sum_{j=0}^{N/2} |A_j|^2} \cdot A_{max} \quad (6-8)$$

式中， A_{max} 为输入加速度峰值； A_j 为输入加速度时程对应于频率 ω_j 的富氏谱值。

⑤对所有土层，计算得到的等效应变与初始应变或上一次迭代计算得到的等效应变间的相对误差 δ 是否满足：

$$\delta \leq 0.05 \quad (6-9)$$

如果式(6-9)不满足，以计算得到的等效应变代替初始应变，重复步骤②-⑤，这样反复迭代，直到满足式(6-9)所要求的精度。

6.1.2 确定地震动输入层

根据工程地质勘探和剪切波速测试结果，工程场地各土层基本上水平展布，地面平坦，因此适合采用一维等效线性化方法进行土层地震反应计算。

确定地震动输入面，并对土层进行分层，其主要依据是工程地质勘察结果和土层剪切波速测试结果。根据《工程场地地震安全性评价(GB17741—2005)》，本报告场地基岩地震动输入面取 $V_s \geq 500 \text{ m/s}$ 的层位。

6.1.3 一维等效线性化方法的数学模型

根据钻探结果，场地分布着粉质粘土和粉土、细砂层，考虑其岩性、成因、物性及其埋深，本次工作粉质粘土和粘土的土动力学参数采用实际测试结果，其中 20 米以上粉质粘土层采用试验编号 1-1 和 2-1 的实测土动力学参数拟合而成，计算土类编号为 1；45 米以上的粉质粘土采用试验编号为 3-2 的实测土动力学参数，计算土类为 4；45 米以下的粉质粘土采用试验编号为 1-5 的实测值，计算土类编号为 5；32 米以上的粉土的土动力学参数采用编号为 1-2 实测值，计算土类编号为 2；50 米以下的粉土和细砂的土动力学参数采用中国地震局行业标准提供的值，计算土类编号为 6 和 3。如表 6.1.1 所示。

表 6.1.1 工程场地动剪应变下模量比与阻尼比值

岩土名称	土类 编号	试验 编号	参数	剪 应 变 γ (10^{-4})							
				0.05	0.1	0.5	1	5	10	50	100
粉质粘土	1	1-1 2-1	G/Gmax	0.9647	0.9595	0.9187	0.8708	0.5862	0.3876	0.0834	0.0506
			ξ	0.0289	0.0311	0.0455	0.0582	0.0977	0.1219	0.1683	0.1702
粉土	2	1-2	G/Gmax	0.9902	0.9823	0.9457	0.9095	0.6789	0.4977	0.1484	0.0921
			ξ	0.0083	0.0132	0.0297	0.0412	0.0725	0.0898	0.1236	0.1317
细砂	3		G/Gmax	0.9800	0.9650	0.8850	0.8050	0.5600	0.4480	0.2200	0.1740
			ξ	0.0050	0.0070	0.0200	0.0350	0.0800	0.1000	0.1200	0.1240
粉质粘土	4	3-2	G/Gmax	0.9802	0.9688	0.9194	0.8766	0.6362	0.4285	0.0990	0.0519
			ξ	0.0241	0.0285	0.0412	0.0495	0.0874	0.1129	0.1598	0.1678
粉质粘土	5	1-5	G/Gmax	0.9876	0.9754	0.9263	0.8831	0.6295	0.4318	0.1323	0.0815
			ξ	0.0124	0.0173	0.0338	0.0437	0.0799	0.0981	0.1327	0.1407
粉土	6		G/Gmax	0.9850	0.9750	0.8580	0.7540	0.4170	0.2850	0.0950	0.0350
			ξ	0.0050	0.0080	0.0250	0.0400	0.0950	0.1170	0.1430	0.1590

根据场地土层的划分情况及土层的物理力学参数，建立了本场地的场地土层地震反应分析模型（表 6.1.1 至表 6.1.4）

表 6.1.1 ZK1 号孔土层地震反应分析模型

层号	岩土名称	土类号	层底深度 (m)	层厚 (m)	密度 (t/m ³)	VS (m/s)	备注
1	粉质粘土	1	2.0	2.0	1.88	221	输出层位
2	粉质粘土	1	4.0	2.0	1.88	195	
3	粉质粘土	1	6.5	2.5	1.88	152	
4	粉土	2	9.2	2.7	1.90	159	
5	粉质粘土	1	12.0	2.8	1.92	194	
6	粉质粘土	1	15.0	3.0	1.92	221	
7	粉质粘土	1	18.0	3.0	1.92	248	
8	粉土	2	21.0	3.0	1.95	261	
9	粉土	2	24.0	3.0	1.95	275	
10	粉土	2	27.0	3.0	1.95	271	
11	粉土	2	30.0	3.0	1.95	288	
12	粉土	2	31.0	1.0	1.95	319	
13	粉质粘土	4	34.0	3.0	1.94	342	
14	粉质粘土	4	37.0	3.0	1.94	324	
15	粉质粘土	4	40.0	3.0	1.94	324	
16	粉质粘土	4	43.0	3.0	1.94	322	
17	细砂	3	45.0	2.0	2.00	348	
18	细砂	3	47.2	2.2	2.00	347	
19	粉质粘土	5	49.0	1.8	1.95	342	
20	粉质粘土	5	51.8	2.8	1.95	355	
21	粉土	6	54.0	2.2	1.97	362	
22	粉土	6	56.0	2.0	1.97	375	
23	细砂	3	59.0	3.0	2.02	400	
24	粉土	6	62.0	3.0	2.01	391	
25	粉土	6	65.0	3.0	2.01	396	
26	粉质粘土	5	68.0	3.0	1.98	407	
27	粉质粘土	5	71.0	3.0	1.98	409	
28	粉质粘土	5	74.0	3.0	1.98	404	
29	粉质粘土	5	77.0	3.0	1.98	432	
30	粉质粘土	5	79.0	2.0	1.98	452	
31	粉土	6	81.0	2.0	2.04	478	
32	细砂	3	82.0	1.0	2.10	491	
33	细砂				2.10	508	基岩输入面

表 6.1.2 ZK2 号孔土层地震反应分析模型

层号	岩土名称	土类号	层底深度 (m)	层厚 (m)	密度 (t/m ³)	VS (m/s)	备注
1	粉质粘土	1	2.0	2.0	1.87	197	输出层位
2	粉质粘土	1	4.0	2.0	1.87	180	
3	粉质粘土	1	7.5	3.5	1.87	158	
4	粉土	2	10.5	3.0	1.90	194	
5	粉质粘土	1	13.0	2.5	1.92	205	
6	粉质粘土	1	16.0	3.0	1.92	234	
7	粉土	2	19.0	3.0	1.95	264	
8	粉土	2	22.0	3.0	1.95	277	
9	粉土	2	25.0	3.0	1.95	270	
10	粉土	2	28.0	3.0	1.95	302	
11	粉土	2	30.0	2.0	1.95	296	
12	粉土	2	32.0	2.0	1.95	333	
13	粉质粘土	4	35.0	3.0	1.94	322	
14	粉质粘土	4	38.0	3.0	1.94	306	
15	粉质粘土	4	41.0	3.0	1.94	314	
16	粉质粘土	4	43.3	2.3	1.94	327	
17	细砂	3	46.0	2.7	2.00	352	
18	细砂	3	47.9	1.9	2.00	345	
19	粉质粘土	5	50.0	2.1	1.96	352	
20	粉质粘土	5	52.0	2.0	1.96	357	
21	粉质粘土	5	54.0	2.0	1.96	376	
22	粉质粘土	5	56.7	2.7	1.96	385	
23	细砂	3	58.3	1.6	2.03	378	
24	粉质粘土	5	61.0	2.7	1.98	383	
25	粉质粘土	5	64.0	3.0	1.98	385	
26	粉质粘土	5	67.0	3.0	1.98	385	
27	粉质粘土	5	70.0	3.0	1.98	412	
28	粉质粘土	5	73.0	3.0	1.98	431	
29	粉质粘土	5	76.0	3.0	1.98	443	
30	粉质粘土	5	79.0	3.0	1.98	469	
31	细砂	3	80.0	1.0	2.08	460	
32	细砂				2.08	510	基岩输入面

表 6.1.3 ZK3 号孔土层地震反应分析模型

层号	岩土名称	土类号	层底深度(m)	层厚(m)	密度(t/m ³)	VS(m/s)	备注
1	粉质粘土	1	2.0	2.0	1.87	168	输出层位
2	粉质粘土	1	3.5	1.5	1.87	132	
3	粉土	2	6.0	2.5	1.89	164	
4	粉土	2	9.0	3.0	1.89	199	
5	粉质粘土	1	11.0	2.0	1.90	217	
6	粉质粘土	1	13.5	2.5	1.90	239	
7	细砂	3	16.8	3.3	1.99	246	
8	粉土	2	19.0	2.2	1.95	257	
9	粉土	2	22.0	3.0	1.95	265	
10	粉土	2	25.0	3.0	1.95	283	
11	粉土	2	28.0	3.0	1.95	275	
12	粉土	2	30.5	2.5	1.95	304	
13	粉质粘土	4	33.0	2.5	1.94	297	
14	粉质粘土	4	36.0	3.0	1.94	327	
15	粉质粘土	4	39.5	3.5	1.94	332	
16	细砂	3	43.0	3.5	2.01	346	
17	细砂	3	46.0	3.0	2.01	349	
18	粉质粘土	5	49.0	3.0	1.96	364	
19	粉质粘土	5	52.0	3.0	1.96	377	
20	粉质粘土	5	55.0	3.0	1.96	371	
21	粉土	6	57.0	2.0	1.99	376	
22	粉质粘土	5	60.0	3.0	1.98	378	
23	粉质粘土	5	63.0	3.0	1.98	398	
24	粉质粘土	5	66.0	3.0	1.98	401	
25	粉质粘土	5	69.0	3.0	1.98	417	
26	粉质粘土	5	72.0	3.0	1.98	393	
27	粉质粘土	5	75.0	3.0	1.98	428	
28	粉质粘土	5	77.0	2.0	1.98	458	
29	细砂	3	80.0	3.0	2.08	466	
30	细砂	3	82.0	2.0	2.08	483	
31	细砂				2.08	516	基岩输入面

表 6.1.4 ZK4 号孔土层地震反应分析模型

层号	岩土名称	土类号	层底深度 (m)	层厚 (m)	密度 (t/m ³)	VS (m/s)	备注
1	粉质粘土	1	2.0	2.0	1.86	158	输出层位
2	粉质粘土	1	5.0	3.0	1.86	162	
3	粉土	2	7.0	2.0	1.88	201	
4	粉土	2	9.7	2.7	1.88	199	
5	粉质粘土	1	12.0	2.3	1.91	214	
6	粉质粘土	1	15.0	3.0	1.91	247	
7	粉质粘土	1	16.5	1.5	1.91	260	
8	粉土	2	19.0	2.5	1.94	255	
9	粉土	2	22.0	3.0	1.94	258	
10	粉土	2	25.0	3.0	1.94	277	
11	粉土	2	28.0	3.0	1.94	258	
12	粉土	2	30.0	2.0	1.94	296	
13	粉质粘土	4	32.0	2.0	1.94	328	
14	粉质粘土	4	35.0	3.0	1.94	334	
15	粉土	6	38.0	3.0	1.96	300	
16	粉土	6	41.0	3.0	1.96	337	
17	粉土	6	44.0	3.0	1.96	328	
18	粉土	6	46.0	2.0	1.96	361	
19	粉质粘土	5	49.0	3.0	1.97	354	
20	粉质粘土	5	52.0	3.0	1.97	369	
21	粉质粘土	5	54.0	2.0	1.97	365	
22	粉土	6	57.0	3.0	1.99	387	
23	粉质粘土	5	60.0	3.0	1.98	411	
24	粉质粘土	5	63.0	3.0	1.98	405	
25	粉质粘土	5	66.0	3.0	1.98	386	
26	粉质粘土	5	69.0	3.0	1.98	393	
27	粉质粘土	5	72.0	3.0	1.98	411	
28	粉质粘土	5	74.0	2.0	1.98	428	
29	粉质粘土	5	76.5	2.5	1.98	434	
30	细砂	3	80.0	3.5	2.09	452	
31	细砂				2.09	513	基岩输入面

6.1 基岩的人造地震动时程

以基岩加速度反应谱和峰值为目标，用数值模拟的方法合成地震动时程，作为场地土层地震动力反应分析的地震动输入值。

6.1.4 方法简介

地震动合成方法的主要思路为：

(1) 用反应谱与功率谱的近似转换关系，将目标反应谱转换成相应的功率谱，转换关系为：

$$S(\omega) = \frac{\varepsilon}{\pi\omega} S_a^2(\omega) / \left\{ -\ln \left[-\frac{\pi}{\omega T} \ln(1-r) \right] \right\} \quad (6-10)$$

其中：

$S(\omega)$: 功率谱; ε : 阻尼比;

$S_a(\omega)$: 目标反应谱;

T : 持续时间;

r : 超过目标反应谱值的概率。

(2) 用三角级数叠加法，生成零均值的平稳高斯过程。

$$X(t) = \sum_{i=0}^n A_i \cos(\omega_i t + \phi_i) \quad (6-11)$$

其中： $A_i = [4S(\omega_i)\Delta\omega]^{0.5}$ ，初相位 ϕ_i 为 $[0 - 2\pi]$ 均匀分布的随机变量。

(3) 将平稳时程乘以非平稳强度包线，得到非平稳的加速度时程。

$$a(t) = \Psi(t) \cdot X(t) \quad (6-12)$$

非平稳包线函数为如下形式：

$$\Psi(t) = \begin{cases} \left(\frac{t}{t_1}\right)^2 & 0 < t \leq t_1 \\ 1 & t_1 < t \leq t_2 \\ e^{-c(t-t_2)} & t_2 < t \leq T \end{cases} \quad (6-13)$$

其中： t_1 : 峰值的上升段；

$t_2 - t_1$: 峰值的平稳段；

T : 持续时间；

c : 峰值的衰减系数。

由于式 (6-10) 表示的反应谱与功率谱的关系是近似关系，所以按初始时程 $a(t)$ 计算出来的反应谱一般只近似于目标谱，符合的程度也是概率平均的。为了提高拟合精度，还需要进行迭代调整。通用的方法是按下式调整式 (6-11) 中的傅氏幅值谱。

$$A^{i+1}(\omega_k) = \frac{S_a^T(\omega_j)}{S_a(\omega_j)} A^i(\omega_k) \quad N_{1j} < k \leq N_{2j} \quad (6-14)$$

式中 $A^i(\omega_k)$ 和 $A^{i+1}(\omega_k)$ 分别为第 i 和 $i+1$ 次迭代的结果, $S_a^T(\omega_j)$ 和 $S_a(\omega_j)$ 为第 j 个控制点的目标谱和计算反应谱。采用上述方式对幅值谱调整仅局限在控制频率 ω_j 附近的 $N_{1j}-N_{2j}$ 个傅里叶分量。通常 ω_{1j} 和 ω_{2j} 按下述方法选取:

$$\omega_{1j} = \frac{1}{2}(\omega_{j-1} + \omega_j) \quad \omega_{2j} = \frac{1}{2}(\omega_j + \omega_{j+1}) \quad (6-15)$$

频段 $\omega_{1j} - \omega_{2j}$ 被称为 ω_j 的主控频段。对于目标谱控制点 ω_j , 迭代运算时只改变主控频段的幅值谱, 这是因为在整个频段中, 由于共振原理主控频段频率分量的改变对 ω_j 反应谱的变化最为敏感, 另一方面调整幅值谱时, 应尽量将幅值谱变化的影响局限在特定的控制频率 ω_j 附近, 以避免在拟合 ω_j 频率处目标反应谱时对其邻近控制频率处的反应谱带来过大的影响, 对幅值谱进行多次迭代修正, 即可使其反应谱向目标谱逼近。在对幅值谱进行迭代修正的同时, 还对相位谱进行迭代修正。

6. 1. 5 持时参数的确定

本文的地震动持续时间参数的确定见下式:

$$LgY_e = C_1 + C_2 M + C_3 Lg(R + C_4) + \varepsilon \quad (6-16)$$

式中, Y_e 可以是 t_i 、 t_s 和 C 三者之一。根据霍俊荣的研究 (1989) 成果, 式中的系数, 根据物理量的不同可分别取表 6.2.1 中的数值。

表 6.2.1 计算地震动强度包络函数的特征参数系数

特征参数	C_1	C_2	C_3	C_4	ε
t_i	-1.074	0	1.0050	10	0.31
t_s	-2.268	0.3262	0.5815	10	0.16
C	1.941	-0.2817	-0.5670	10	0.10

根据概率地震危险性分析求得的等效震级和等效距离, 利用 (6-16) 和表 6.2.1 求得包络函数的特征参数见表 (表 6.2.2)。

表 6.2.2 等效震级、等效距离和包络函数的特征参数

超越概率	等效震级	等效距离 (km)	t_1	t_2	C
50 年超越概率 63%	6.2	135.0	25.6	40.4	0.117
50 年超越概率 10%	6.8	112.0	21.5	42.6	0.088
50 年超越概率 2%	7.2	102.0	19.7	46.8	0.071

6. 1. 6 目标谱及基岩地震动时程的合成

在合成本工程场点基岩地震动时程时, 50 年和 100 年超越概率 63%、10%、2% 所对

应的目标峰值加速度和反应谱取前面危险性分析得到的结果。根据所给参数分别合成六个概率水平的地震动时程。为了考虑相位随机性的影响，对于每一概率水平情况都分别合成三个不同随机相位的地震动时程样本。合成的时程均以 0.02 秒为间隔。

目标反应谱在 0.04~6.0 秒内取 56 个控制点，以保证合成地震动时拟合目标反应谱的精度。在合成过程中，利用逐步逼近目标谱的方法，使合成的加速度时程精确满足目标峰值加速度，并近似满足目标加速度反应谱。本项目中拟合目标加速度反应谱时其拟合相对误差小于 5%。图 6.2.1-图 6.2.6 分别是 50 年超越概率 63%、10%、2% 六种概率水平的目标谱拟合对比图和基岩水平加速度时程，其中在目标谱拟合对比图中，实线代表目标谱，加圆点实线代表拟合反应谱。

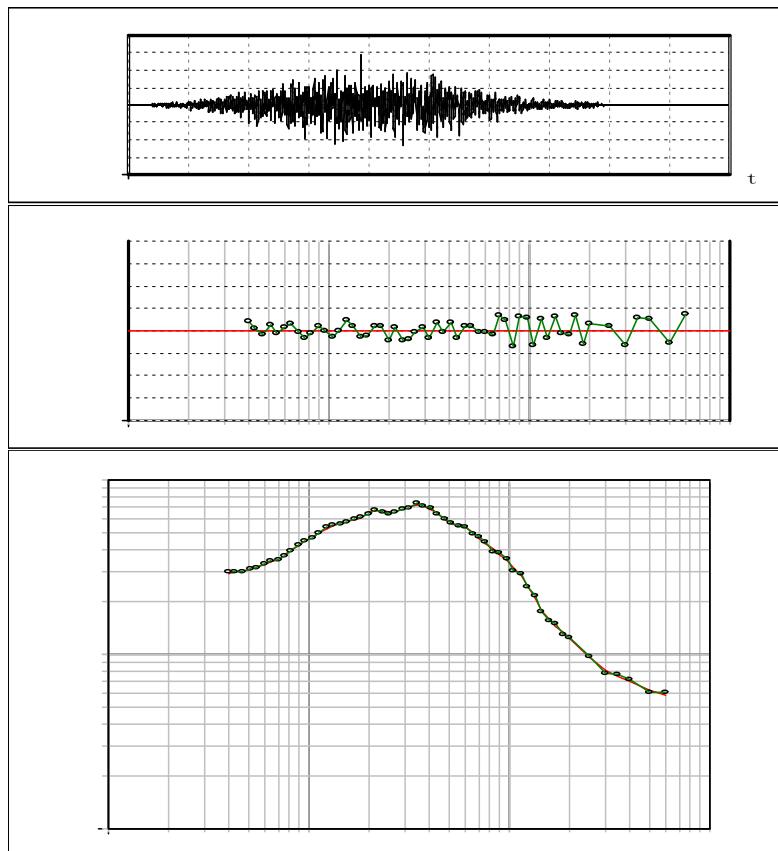


图 6.2.1 场地水平基岩地震动加速度时程及拟合谱之一(50 年 63%)

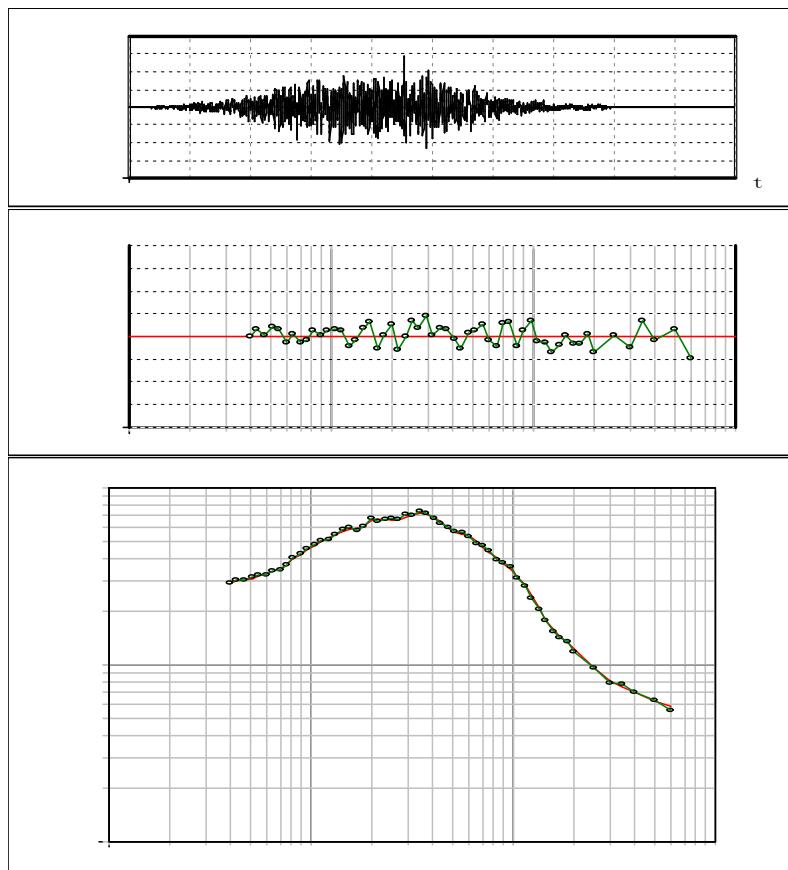


图 6.2.2 场地水平基岩地震动加速度时程及拟合谱之二(50 年 63%)

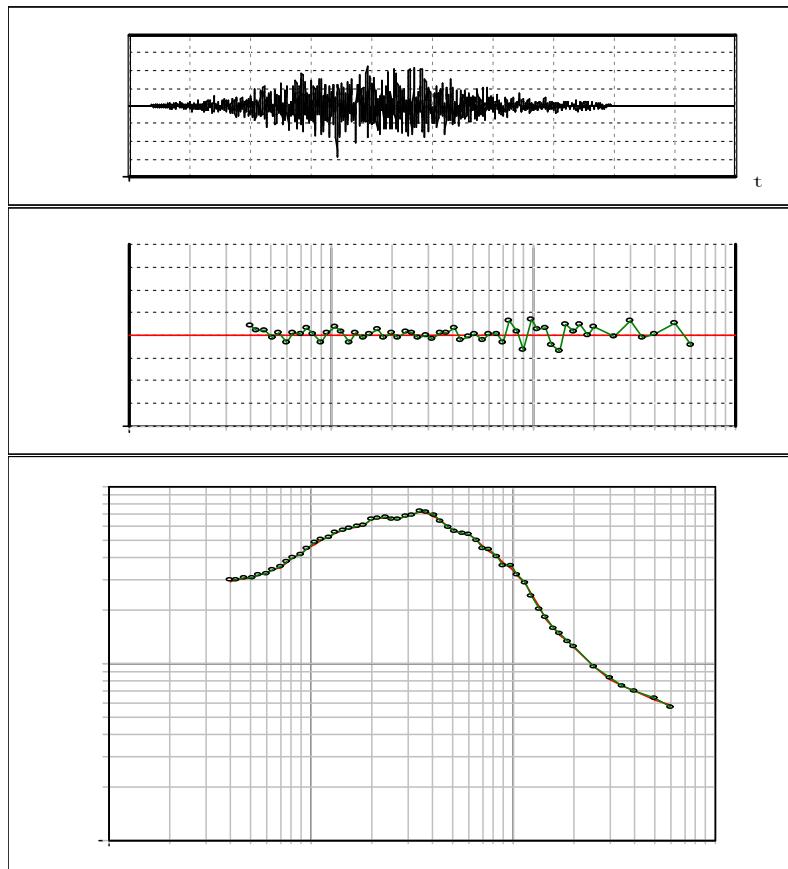


图 6.2.3 场地水平基岩地震动加速度时程及拟合谱之三(50 年 63%)

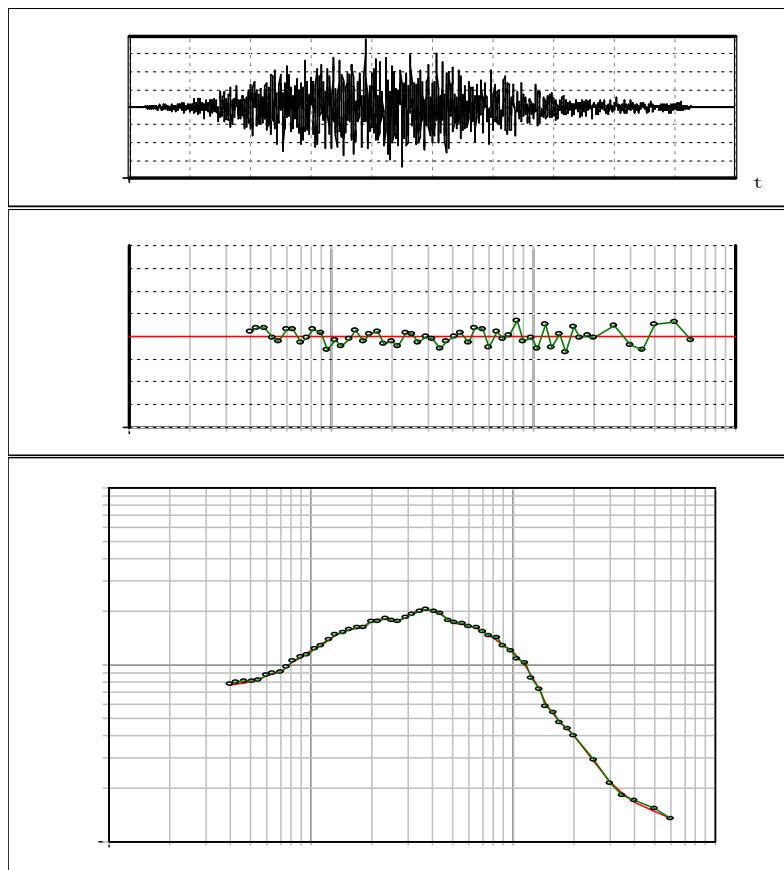


图 6.2.4 场地水平基岩地震动加速度时程及拟合谱之一(50 年 10%)

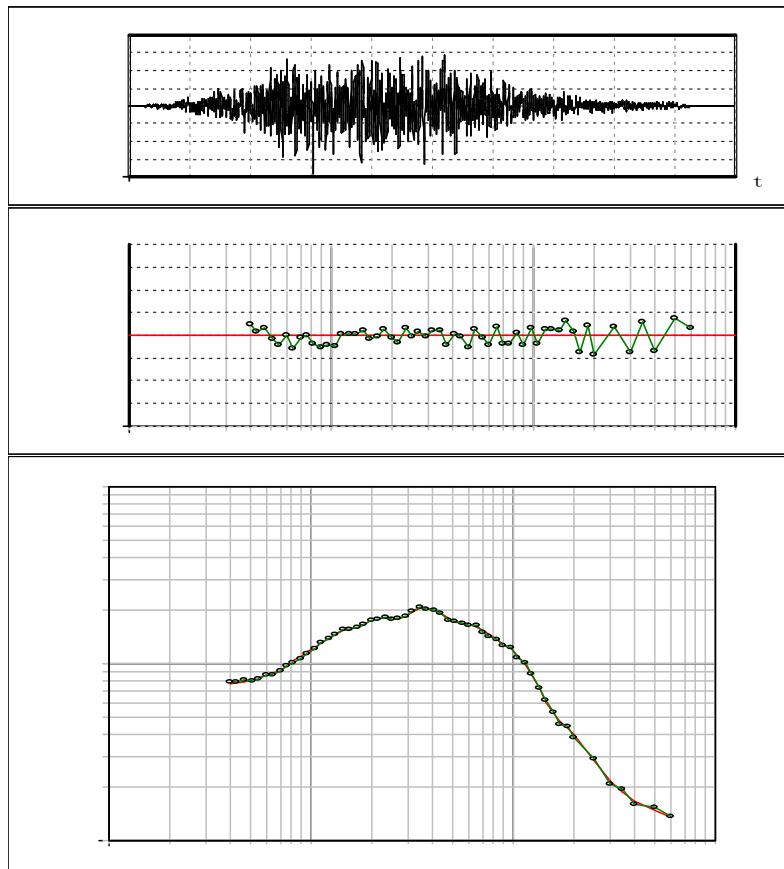


图 6.2.5 场地水平基岩地震动加速度时程及拟合谱之二(50 年 10%)

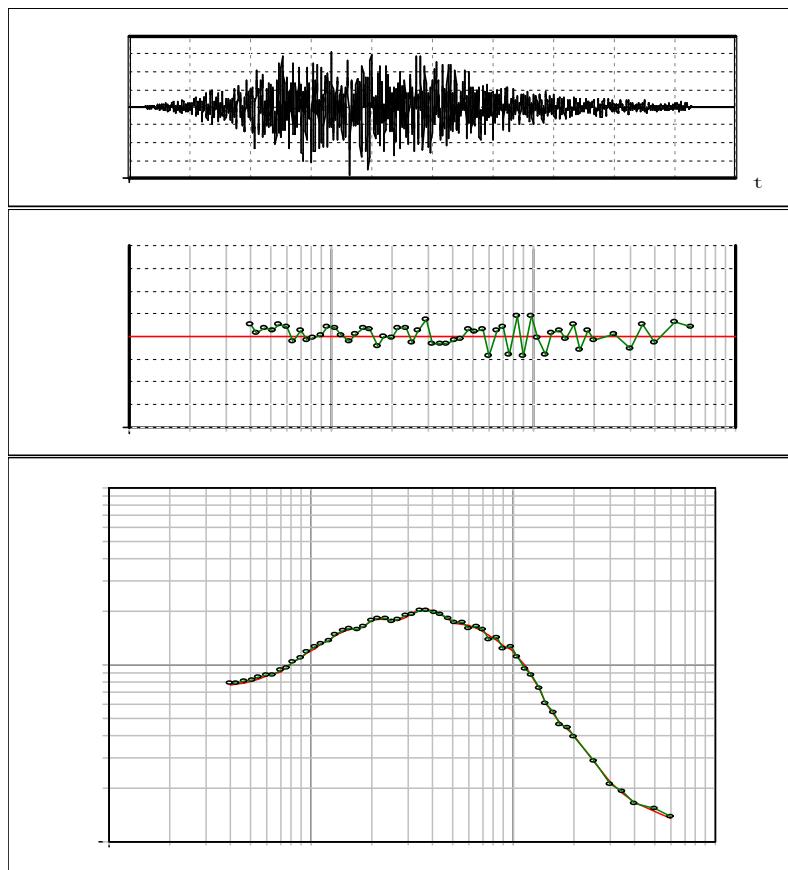


图 6.2.6 场地水平基岩地震动加速度时程及拟合谱之三(50 年 10%)

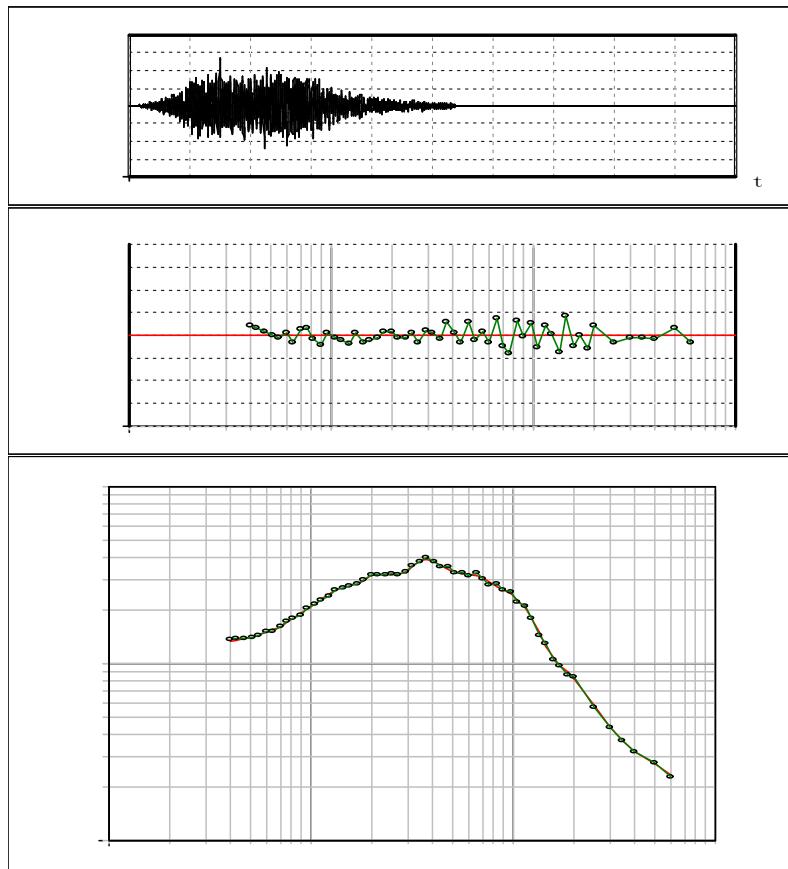


图 6.2.7 场地水平基岩地震动加速度时程及拟合谱之一(50 年 2%)

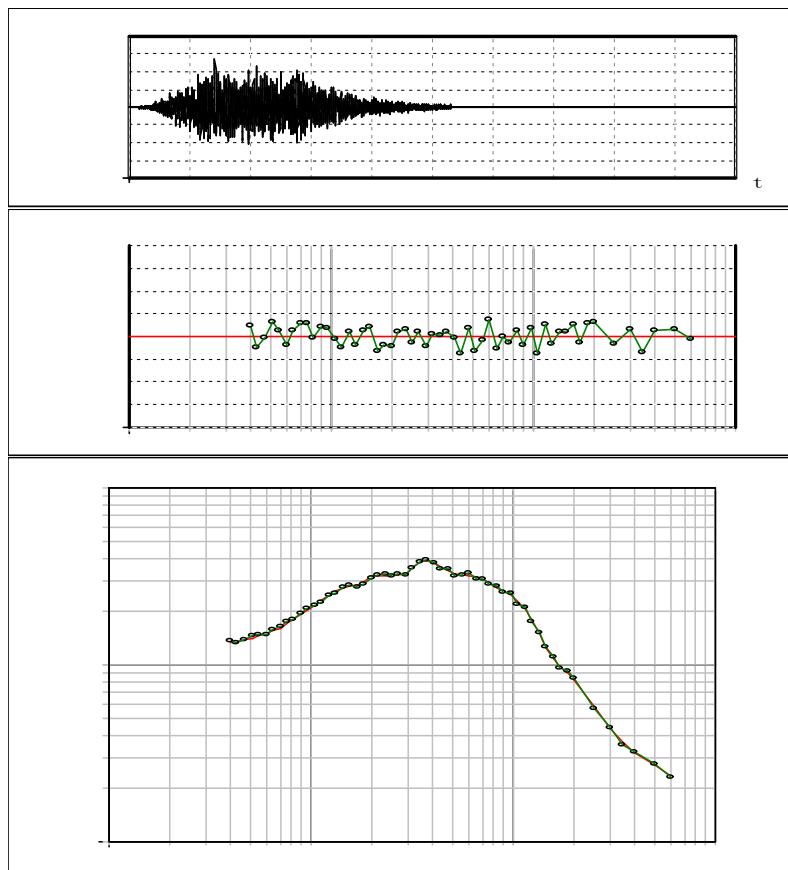


图 6.2.8 场地水平基岩地震动加速度时程及拟合谱之二(50 年 2%)

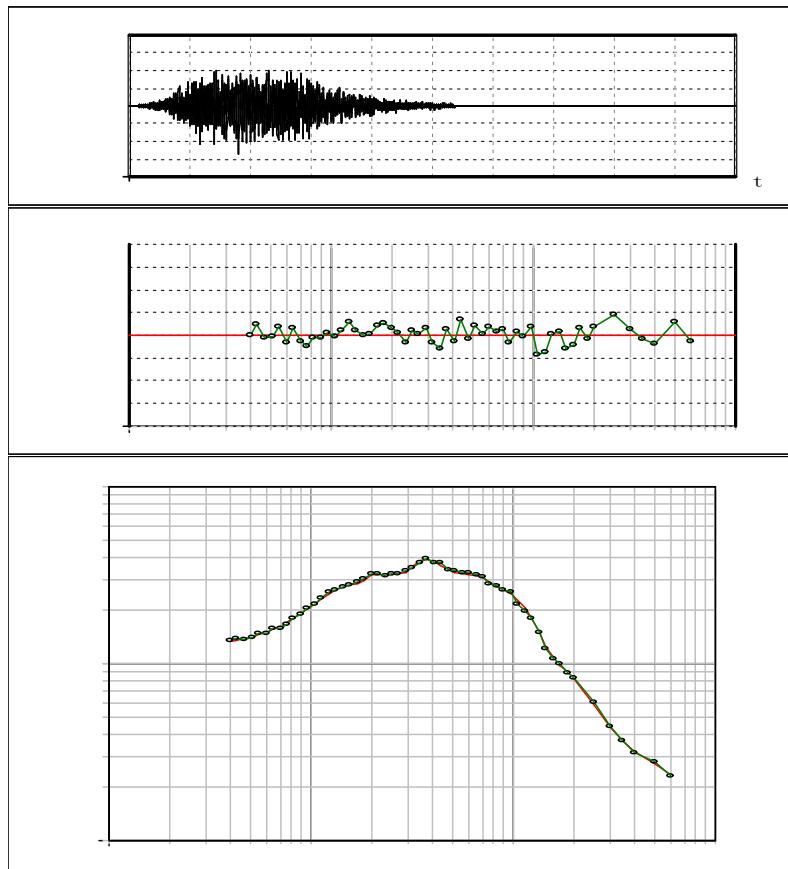


图 6.2.9 场地水平基岩地震动加速度时程及拟合谱之三(50 年 2%)

6.2 地震反应分析计算结果

以上一节得到的工程场地 3 个概率水平的基岩加速度时程(每一概率各 3 条时程),按幅值减少一半确定一维土层分析模型的计算基底入射波输入量,对每一种情况分别进行水平向地震反应计算得到了场地自由表面地震动参数,计算结果如下。

6.1.7 水平向地震峰值加速度

经分析计算,得到 50 年超越概率 63%、10%、2% 六个概率水平的地表各三个不同随机相位的水平峰值加速度及平均值,分别列于表 6.3.1。表中所列数据表明,随机相位存在一定的影响。本工程中,地震动参数中的水平加速度峰值可以取 2 个钻孔的不同随机相位反应计算的平均值。

表 6.3.1 地面水平峰值加速度计算结果(gal)

超越概率	1 号孔	2 号孔	3 号孔	4 号孔	均值
50 年 63%	32.2	31.7	31.6	32.4	31.7
	32.2	31.9	32.0	31.9	
	32.0	30.6	30.5	31.4	
50 年 10%	91.6	91.0	91.8	92.6	89.8
	90.7	91.6	90.2	92.5	
	85.2	86.2	87.3	86.7	
50 年 2%	158.2	158.6	160.1	158.1	157.1
	158.2	157.9	159.1	158.1	
	155.0	155.5	157.9	155.6	

6.1.8 水平向地震动加速度反应谱

建筑场地土层动力放大系数曲线见图 6.3.1 至图 6.3.3。

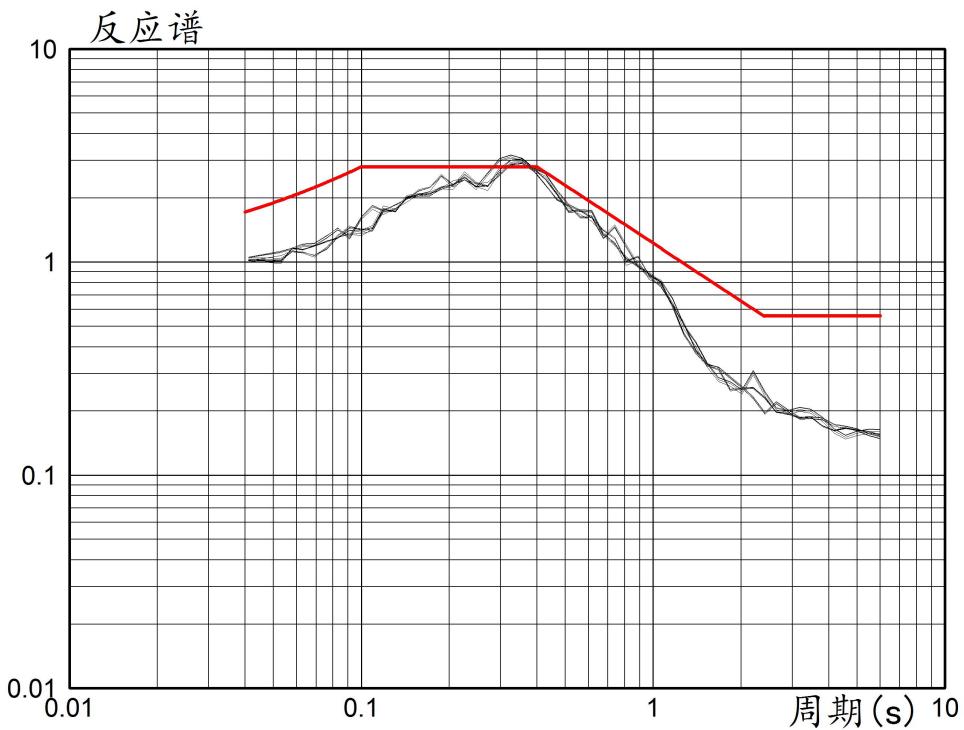


图 6.3.1 场地地表水平地震加速度放大系数反应谱（50 年 63%）

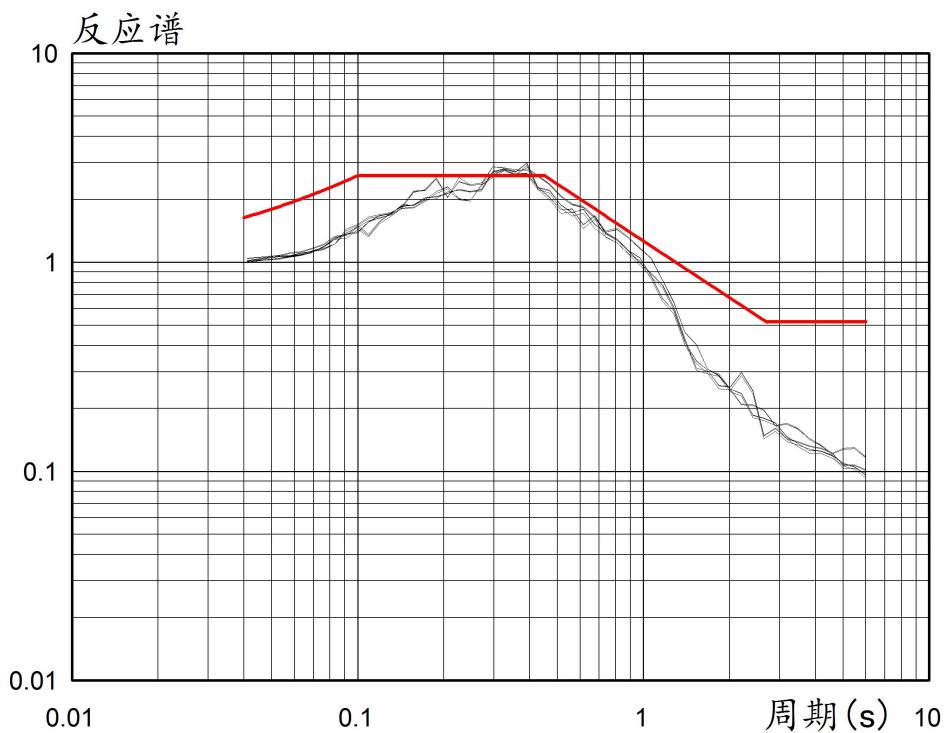


图 6.3.2 场地地表水平地震加速度放大系数反应谱（50 年 10%）

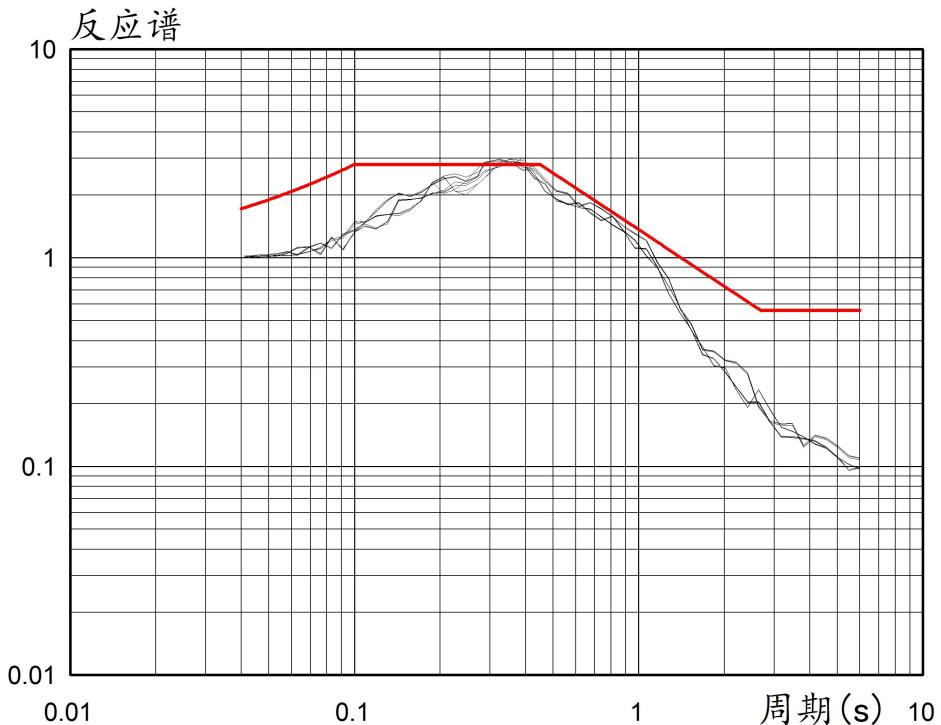


图 6.3.3 场地地表水平地震加速度放大系数反应谱 (50 年 2%)

6.1.9 场地设计地震动参数的确定

在上一节中得到的场地土层地震反应分析计算结果的基础上，本节将确定工程场地设计地震动参数。工程场地设计地震动参数包括设计地震动峰值加速度和加速度反应谱。

工程场地设计地震动加速度反应谱取为：

$$S_a(T) = A_{\max} \beta(T)$$

$$\alpha_{\max} = A_{\max} \beta_m / 980$$

其中， A_{\max} 为设计地震动加速度峰值， $\beta(T)$ 为设计地震动加速度放大系数反应谱， α_{\max} 为地震影响系数最大值，并有：

$$\beta(T) = \begin{cases} 1 + (\beta_m - 1) \frac{T}{T_1} & 0.04 < T < T_1 \\ \beta_m & T_1 \leq T < T_g \\ \beta_m \times \left(\frac{T_g}{T} \right)^{\gamma} & T_g \leq T < T_k \\ 0.2 \beta_m & T_k < T < 6.0 \end{cases}$$

式中， T 为反应谱周期， β_m 为反应谱最大值， T_g 为反应谱特征周期。

采用上述公式结合工程场地地表和基础面的六个超越概率的水平向地震加速度放大系数反应谱(5%阻尼比)的计算结果,得到相应的拟合曲线,作为对应场地地表和基础面的水平向设计地震动加速度放大系数反应谱(5%阻尼比)曲线,如图 6.3.1 至 6.3.3 中的粗实线所示。

表 6.4.1 及图 6.3.1 到 6.3.3 给出了工程场地不同超越概率地表的设计地震动峰值加速度及加速度反应谱参数值及相应曲线。

表 6.4.1 场地自由地表设计地震动峰值加速度反应谱参数值

超越概率	A_{\max} (gal)	α_{\max}	T_1 (s)	T_g (s)	T_k (s)	β_m	γ
50 年超越概率 63%	31.7	0.091	0.1	0.40	2.4	2.8	0.9
50 年超越概率 10%	89.8	0.238	0.1	0.45	2.7	2.6	0.9
50 年超越概率 2%	157.7	0.451	0.1	0.45	2.7	2.8	0.9

7 结论与使用说明

7.1 地震活动性分析结果

(1) 从公元元年到 2020 年 12 月, 区域内记载到 $M \geq 4.7$ 级地震 40 次。1970 年以来, 区域内共记录 $M_L \geq 3.0$ 级地震 189 次。

(2) 区域破坏性地震在空间分布上呈现出不均匀性, 地震活动北强南弱, 范县-菏泽一带地震活动水平较高。区域现代地震活动在空间分布上呈现出不均匀性, 地震活动仍是北强南弱, 范县-菏泽一带地震丛集特征明显, 呈团簇状分布。

据 1970 年以后的仪器记录资料, 区域地震的震源深度主要分布在 6~20km 范围内, 区域内的地震基本是发生在地壳中上层的浅源构造地震。

(3) 区域涉及华北平原地震带、郯庐地震带。华北平原地震带未来百年地震活动趋势应以平均活动水平来估计; 郯庐地震带未来可能进入下一活跃期前的应变加速释放阶段, 会有中、强地震活动。

(4) 区域内在历史上曾多次遭受过破坏性地震的影响, 工程场地历史地震最大影响烈度达Ⅶ度。

(5) 根据区域震源机制解资料, 区域主要处于以北东东走向的水平压应力和北北西走向的水平张应力为特征的构造应力场作用之下。

(6) 近场区内没有破坏性地震的历史资料记载。1970 年至 2020 年 12 月共记录到 $M_L \geq 2.0$ 级地震 10 次, 最大地震为 $M_L 2.9$ 级。近场区现代地震活动具有频率低、强度小的特点, 地震分布较为分散, 地震活动水平较低。综合现代及历史地震活动性分析认为, 近场区发生中强以上地震的可能性不大。

7.2 区域地震地质研究成果

区域地震构造环境中对本场址有较大影响的主要构造有: 汤阴地堑、东濮地堑构造单元。它们都具有北北东向控制坳陷、隆起发育的大型断裂, 并且这些断裂多发生于大型隆起与坳陷的边界断裂带上。

上述地震构造中, 第四纪以来多期活动, 聊兰构造带上 1937 年发生过菏泽 7 级地震, 符合 7.0~7.5 级地震的发震构造条件, 具有发生 7.0~7.5 级地震的背景。

区域地震构造环境中对本场址有影响的主要构造还有: 新乡-商丘断裂, 许昌-太康断裂、曹县断裂、巨野断裂、夏邑-太和断裂。它们符合中强地震的发震构造条件, 具有发生中强地震的背景。

7.3 近场地震构造研究成果

近场区内存在三条第四纪活动断裂，其中新乡-商丘断裂是新构造单元鲁西南斜坡带和太康凸起的分界断裂，其规模较大，活动性较强。其它断裂也有不同程度的活动。综合分析认为，近场区不具备发生中强以上地震的构造条件。

7.4 地震危险性分析

目标区 50 年超越概率 63%、10% 和 2% 三个危险水平的基岩水平加速度峰值见表 7.4.1。对场地基岩水平峰值加速度起主要贡献作用的潜源为菏泽、商丘潜在震源，其次为新乡、范县源。

表 7.4.1 工程场地基岩水平向峰值加速度

50 年	63%	10%	2%
加速度 (gal)	21.9	65.8	119.4

7.5 场地工程地震条件和地震地质灾害

目标区所处地貌单元为黄河冲积平原。在钻孔揭露范围内 (90m) 地层均为第四纪地层。

土层等效剪切波速平均值为 202m/s，覆盖层厚度为 80~82mm。本工程场地土类型为中软场地土，建筑场地类别为 III 类。

工程场地地基粉土和砂土轻微液化。工程场地可不考虑软土震陷、崩塌与滑坡、活动断裂等地震地质灾害的影响。

7.6 工程场地设计地震动参数

工程场地设计地震动加速度反应谱取为：

$$S_a(T) = A_{\max} \beta(T)$$

$$\alpha_{\max} = A_{\max} \beta_m / 980$$

其中， A_{\max} 为设计地震动加速度峰值， $\beta(T)$ 为设计地震动加速度放大系数反应谱， α_{\max} 为地震影响系数最大值，并有标准反应谱 $\beta(T)$ 的表达式为：

$$\beta(T) = \begin{cases} 1 + (\beta_m - 1) \frac{T}{T_1} & 0.04 < T < T_1 \\ \beta_m & T_1 \leq T < T_g \\ \beta_m \times \left(\frac{T_g}{T}\right)^{\gamma} & T_g \leq T < T_k \\ 0.2 \beta_m & T_k < T < 6.0 \end{cases}$$

式中， T 为反应谱周期， β_m 为反应谱最大值， T_g 为反应谱特征周期。

工程场地的设计标准谱的特征参数由表 7.6.1 列出。

表 7.6.1 工程场地自由地表设计地震动峰值加速度反应谱参数值

超越概率	A_{\max} (gal)	α_{\max}	T_1 (s)	T_g (s)	T_k (s)	β_m	γ
50 年超越概率 63%	31.7	0.091	0.1	0.40	2.4	2.8	0.9
50 年超越概率 10%	89.8	0.238	0.1	0.45	2.7	2.6	0.9
50 年超越概率 2%	157.7	0.451	0.1	0.45	2.7	2.8	0.9

7.7 使用说明

工程场地设计水平地震动峰值加速度见表 7.6.1，设计地震动加速度反应谱根据表的参数依设计地震动反应谱计算公式确定。

本结果仅适用于濮阳经济技术开发区场地。

8 主要参考文献

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会, 2005, 工程场地地震安全性评价 (GB17741-2005), 中国标准出版社。

国家质量技术监督局, 2001, 中国地震动参数区划图 (GB18306-2001)。

中华人民共和国建设部, 国家质量监督检验检疫总局, 2001, 建筑抗震设计规范 (GB 50011-2010), 中国建筑工业出版社

胡聿贤, 2006, 地震工程学 (第二版), 北京, 地震出版社。

国家地震局震害防御司《中国历史强震目录》(公元前 23 世纪—公元 1911 年)。

中国地震局震害防御司《中国近代地震目录》(公元 1912 年—1990 年 $M_s \geq 4.7$)

河南省地质局, 1981, 河南省地质图及说明书 (1:50 万)。

刘尧兴等, 2001, 豫北地区新构造活动特征及中长期地震预报研究, 西安地图出版社。

河南省地质矿产局, 1989, 河南省区域地质志, 地质出版社。

李国鹏, 1973. 中国东部中、新生代地质构造发展与地震. 地质科学, 第 3 期。

地质部航空物探大队 904 队. 1957. 华北平原南部及周围山区航空磁测结果报告。

赵景珍, 刘永泉, 张香荣等, 1991, 岩石圈动力学区域各论 (河南省), 中国岩石圈动力学概论, 地震出版社。

赵景珍, 刘永泉, 张香荣等. 1989. 河南地震构造. 中国岩石圈动力学地图集. 中国地图出版社.

山东省地矿局第二水文地质工程地质大队, 1998, 山东省第四系.

虢顺民, 李如成, 2001, 第四纪地层变化与聊城—兰考断裂第四纪活动性, 聊城—兰考断裂综合研究及黄河下游河道稳定性分析, 黄河水利出版社。

中国地震局地质研究所等, 2001, 西气东输工程场地地震安全性评价。

地质部河南省地质局, 1965, 临汝幅地质图及说明书 (1/200000)。

地质部西北地质局, 1965, 鲁山幅地质图及说明书 (1/200000)。

王基华, 郝书俭, 张晚霞, 2001, 聊城—兰考隐伏断裂的化探、物探研究, 聊城—兰考断裂综合研究及黄河下游河道稳定性分析. 黄河水利出版社。

张崇立, 2001, 现代地壳形变与地震的关系. 西气东输工程场地地震安全性评价。

应绍奋, 沈永坚, 黄立人等, 1997, 中国大陆形变场及中长期地震危险区划分. 中

国大陆 2005 年前强震危险性预测研究, 地震出版社。

马杏垣, 1987, 中国岩石圈动力学纲要 (1:400 万中国及邻近海域岩石圈动力学说明书), 地质出版社。

张祖胜等, 1991, 现代地壳形变, 中国岩石圈动力学概论, 地震出版社。

赵景珍等, 1984, 豫北地区中强地震构造背景的讨论, 地震地质 6(2)。

国家地震局地质研究所. 1995. 河南宝泉抽水蓄能电站场地地震基本烈度复核.

国家地震局, 1996, 中国地震烈度区划图(1990)概论, 地震出版社

城乡建设环境保护部, 2010, 建筑抗震设计规范 GB50011-2010, 中国建筑工业出版社。

胡聿贤, 1989, 地震工程学, 地震出版社。

霍俊荣, 1989, 近场强地面运动衰减规律的研究, 博士论文, 中国地震局工程力学研究所。

蒋溥, 王启鸣等, 1990, 地震小区划概论, 地震出版社。

时振梁、鄂家全、高孟潭, 1991, 地震区划原则和方法的研究—以华北地区为例, 地震学报, 13(2):179-188。

汪素云、俞言祥、高阿甲、阎秀杰, 2000, 中国分区地震动衰减关系的确定, 中国地震, 16(2):99-106。

鄂家全、贾素娟, 我国东北和华北地区中强地震潜在震源区的划分原则和方法, 中国地震, Vol. 12, No. 2, 173-194。

张裕明, 1993, 在确定潜在震源区中地震和地质资料的应用, 地震地质, Vol. 15, No. 2, 275-278。

周本刚、张裕明、董瑞树等, 1997, 划分潜在震源区的地震地质规则研究, 中国地震, Vol. 13, No. 3, 241-252。

赵凤新, 1996, 地震动反应谱与相位差谱的关系, 地震学报, 18 (3)

李小军, 1992, 场地土层对地震地面运动影响的分析方法, 世界地震工程, 2 期。

兆隆·金盾国际(商丘)岩土工程勘察报告

