

地震工程地质导论

王钟琦 谢君斐 石兆吉 著

地震出版社

地震工程地质导论

王钟琦 谢君斐 石兆吉 著

地震出版社

1983

内 容 提 要

本书系作者根据多年从事地震工程科研与工程抗震的实际经验,并结合国内外的最新科研成果而撰写的专著。其主旨在于为工程抗震工作提供有关评价场地地基各种地震效应的最新理论、方法和经验,同时在地震工程与工程地质之间建立起有机的联系,并试图发展成一门新的分支学科。全书共分八章。在地震液化、地震造成的地表非连续性变形、地震断裂、场地条件对震害的影响、场地运动特征及其对工程设施的可能影响,以及地震工程地质勘察等章中,纳入了作者的特有研究成果,例如,关于液化的宏观研究、构造性地裂与发震断裂的不同机制和双重效应、各种特殊的地面波动现象及共振破坏实例剖析、各种地形地貌及土质岩性与地层结构等场地条件的直接与间接影响等问题,都有一系列新的论点和评价。

本书可供土木工程、地震工程及工程地质技术人员及专业科研、教学工作参考;也可作为大学有关专业学生的学习教材。

地震工程地质导论

王钟琦 谢君斐 石兆吉 著

地震出版社 出版

北京复兴路63号

朝阳区建外印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

787×1092 1/16 18.5 印张 45.5 千字

1983年1月第一版 1983年1月第一次印刷

印数: 3,000

统一书号: 13180·175 定价: 2.80元

前 言

地震工程是一门抗御地震自然灾害,保障人民生命财产安全的应用科学。自从它建立以来,由于客观的需要,特别是近二十年来场地与地基在工程抗震上的重要性日益受到人们的注意,致使这门科学一直在扩展其内容和范畴,逐渐把土建工程抗震的各个方面列为其研究的对象。

一些强烈地震造成的工程破坏表明,仅着眼于工程结构本身的抗震是不够的,因为没有任何建筑物能够脱离地面成为空中楼阁,而场地地基的失效会从根本上动摇任何工程设施的稳定性。更重要的是,大量的宏观震害显示出场地地基还有许多非直观的或间接的影响,需要进行深入的探索。在这方面,自从五十年代初期豪斯纳(G. W. Housner)提出地震反应谱理论以后,开始有了新的途径来预测由于土质岩性不同而造成场地上某个计算点的地震运动的差异。此外,在预测地震液化势等问题上近十多年来也取得了极大的进展。

然而,不能不看到现有的地震工程学对于场地地基在地震中的全部反映和表现还缺乏系统的、综合的研究和论述。甚至不少宏观现象还没有被认识和探索。特别是在实际工程抗震中这些实际问题往往被人忽视,或者由于对某种宏观现象缺乏认识而产生盲目害怕的思想。结果不是由于抗震措施不足而难免使工程设施在一次强烈地震侵袭下毁于一瞬,就是采取极为保守的措施,造成无形的浪费和损失。这不能不归咎于这一理论体系尚不健全和抗震方法尚不完善。总之,在地震工程中有关场地地基问题,不仅需要向纵深研究,而且还应发展横向联系。

鉴于上述情况,本书试图把现有的地震工程与工程地质两门学科有机地结合起来,建立一个新的分支——地震工程地质。其主旨在于为工程抗震工作提供有关评价场地地基各种地震效应的辅助方法、实践经验以至相应的理论,以便更全面地看待和处理这些问题,促使地震工程学与岩土工程学相互渗透、相互补充。

本书作为导论,在某些课题上所提出的若干浅见,其根据仅仅是作者本人从事地震工程科研和实践的所得。由于某些问题的复杂性,指望在这本导论中求得完满的解答是不可能的,只期望此书的出版能起到一点“抛砖引玉”作用。所以在这里只是提出问题和对问题的看法,希望引起广泛的兴趣和注意,争取今后能在更为广阔的范围内进行深入研究,并逐步使其发展成为地震工程与工程地质学中一个强劲有力的分支,从而为强震区的工程抗震提供可靠的依据。

为了照顾内容的系统性,本书援引了国内外已取得的重要研究成果,并且以此为基础进行了某些补充性论述。

本书第一、三、四、七、八各章由王钟琦撰写,第六章由石兆吉、谢君斐撰写,第二、五章由三人合著,全书由王钟琦总编。

在本书的撰写过程中,得到了中国建筑科学研究院勘察技术研究所、中国科学院工程力学研究所和其它有关单位及科研、生产人员的支持和帮助,谨此致以衷心的感谢。

王钟琦 谢君斐 石兆吉

1980年12月

总 目

第一章	地震工程地质及其研究目的与任务	(1)
1.1	历史的回顾	(1)
1.2	宏观震害的重复性——地震工程地质条件的决定作用	(2)
1.3	地震工程地质学的研究目的与任务	(3)
1.4	地震工程地质研究中的若干主要方面	(6)
第二章	波动、地面运动及地震烈度	(9)
2.1	波与波动	(9)
2.2	地面运动的计算及其检验	(21)
2.3	地震烈度问题	(37)
第三章	地震造成的地表非连续性变形概说	(42)
3.1	地表非连续性变形的工程意义	(42)
3.2	地表非连续性变形的类型及其性状	(42)
3.3	重力性地裂及地震滑移	(44)
3.4	构造性地裂	(48)
3.5	地裂的地震效应	(53)
3.6	构造性地裂的总效应	(57)
3.7	地面断裂的重复性	(57)
3.8	两类地裂的鉴别	(58)
第四章	地震断裂	(61)
4.1	断裂的生成机制	(61)
4.2	断裂的活动性	(66)
4.3	断裂错动的可能性问题	(67)
4.4	断裂机制及影响场	(71)
4.5	断裂带的地震工程地质评价	(82)
第五章	地震液化	(91)
5.1	地震液化的基本概念问题	(93)
5.2	地震液化机理	(96)
5.3	地震液化的宏观机制	(114)
5.4	地震液化宏观形迹的分析	(123)

5.5	地震液化势的评价	(133)
5.6	地震液化在宏观震害中的双重作用	(149)
第六章	地震工程地质条件对宏观震害的影响	(152)
6.1	概说	(152)
6.2	地层和土质条件的影响	(153)
6.3	地形条件的影响	(177)
6.4	地层结构条件的影响	(185)
6.5	场地内断裂带的影响	(190)
6.6	地基失效	(194)
第七章	场地运动特征及其对工程设施的可能影响	(197)
7.1	问题的背景	(197)
7.2	场地波动的基本特征	(203)
7.3	场地波动的效应	(209)
第八章	地震工程地质勘察	(214)
8.1	研究对象及内容	(214)
8.2	历史地震区的勘察	(220)
8.3	拟建工程场地的勘察工作	(223)
8.4	地震工程地质参数的测定	(229)
8.5	地震作用下的岩土工程评价问题	(241)
附录 I	水平土层液化势判别分析程序	(246)
附录 II	ICWP 程序	(259)

第一章 地震工程地质及其研究目的与任务

1.1 历史的回顾

强烈地震，常会造成不同程度的灾害，给人民生命财产带来损失。人们为着抗御这种灾害，曾经做过长期的观测和分析研究工作。我国关于地震的记载，最早始于公元前 1177 年（商帝乙三年），及至十五世纪以后，在大多数的县志中，都可见到较为详细的地震记载，而且对于震情的描述也日趋确切。据统计，从公元前 780 年，到公元 1976 年，共记载了 6 级以上的地震约 664 次，其中接近 8 级和 8 级以上的地震共约 22 次。十九世纪以前，由于没有定量记录的手段，所以关于地震的强度，只能根据当时历史记载，推论其烈度大小，并折算其震级。十九世纪以来，由于人们可以利用地震仪进行记录，所以近一百年的地震震级是按仪器记录计算的，因此其数据也较为准确可靠。1897 年 6 月 12 日印度不丹之间的 8.7 级强震，就是第一次记录并计算出来的。

但是，对地震的研究正式成为一门学科，还是本世纪的事情。1906 年 4 月 18 日美国旧金山大地震($M \approx 8.4$) 不仅揭示了各种结构物在抗震性能上的不同表现，而且发现旧金山城区及郊区的不同震害，主要是由于各处地质特征的差异造成的^[1]。1923 年 9 月 1 日关东大地震($M=8.2$)，进一步显示出具有刚性和柔性结构的建筑物，在三种不同土质条件地区上有明显差别^[2]。这些客观现象，引起了人们的关注和兴趣，于是国际上开始对防震及抗震进行专门的研究。有的国家创办了地震研究所（如日本“东大震研”），也有的成立了地震学会。1933 年 3 月 10 日美国长滩地震，首次用强震仪直接在震中地区记录到当地地震的最大加速度($\alpha_{\max}=0.23\text{ g}$)，以后又于 1940 年 5 月 18 日帝国河谷地震中在埃尔森特罗(El Centro)，1952 年 7 月 21 日科伦康特地震中在塔夫特(Taft)，分别实测到当地的地震最大加速度值($\alpha_{\max}=0.33, 0.18\text{ g}$)，这就为地震工程的研究打下了定量分析的基础。

五十年代形成了以工程抗震为主题的《地震工程学》，并于 1956 年在美国加州伯克利召开了第一届世界地震工程会议。这标志着在抗御地震方面的研究，已经发展到以一门新学科的水平进行着世界规模的深入探索阶段。然而，这个时期人们的注意力主要放在工程结构物的抗震方面，至于场地地基的抗震性能及其对宏观震害的影响问题，尚未引起普遍的重视。

六十年代中期，在全球范围内发生了两次具有深远意义的强烈地震，一次是 1964 年 3 月 27 日美国阿拉斯加地震($M=8.4$)，另一次是 1964 年 6 月 16 日日本新潟地震($M=7.5$)。后者导致新潟市严重的砂土液化，伴随着大量喷水冒砂，而使一些工业与民用建筑、道路、桥梁及其他工程设施遭受了彻底的破坏^[3]；前者则在产生大面积液化的同时，并发了严重的地震滑移，造成极大的破坏。而安克雷季的绝大部分在第二次世界大战后经过抗震设计的建筑物，地震有选择地破坏了其中一部分，特别是自振周期较长的高层建筑^[4]。这两次地震的深远意义就在于唤起了人们对场地地基抗震问题的普遍关切。所以从六十年代后期以来，国际上愈来愈多的学者认识到场地地基工程地质条件对客观震害的直接或间接影响是不容忽视的，并开始组织系统的研究。日本在 1967 年成立的砂土液化专门委员会，就是一例。

在我国，1966 年 3 月 8 日及 3 月 22 日接连发生了邢台地震，在盗阳河沿岸发生的液化

滑移现象也是令人怵目的。自那以后,很多单位组织了专门研究力量*,向这个新领域探索。

七十年代以来,地震工程在研究场地与地基的地震效应方面取得了新的发展和突破。例如:①在分析与判定饱和砂土地震液化势方面开始建立了定量计算方法^[5];②对于地基与上部建筑物的某些共同作用问题,也有了定量的分析方法;③在研究场地的地震效应方面开辟了新的途径——按地面动力反应进行小区划分,并试图用预计的地面运动物理量代替小区域烈度调整;④开始注意和探索了场地整体稳定性,诸如地震滑移、断裂等问题;⑤在强震作用下,地基承载力评价以及动土压力计算等问题的研究也取得显著进展。随着对场地地基问题的深入研究,人们不得不借助于工程地质、岩土力学等有关学科的理论和方法。换言之,岩土工程(Geotechnical Engineering)开始大量地渗透到地震工程中来。1977年在印度新德里召开的第六届世界地震工程会议中,新开辟了一个“土力学与土工构筑物”专门小组,就是一个明显的动向。

尽管七十年代以来,在研究场地地基的地震效应方面取得了重要的进展,但是不能不看到迄今关于场地地基在一次地震运动中可能表现出来的这种或那种性状,以及对各种工程设施可能产生的这种或那种影响问题,还都停留在分散的、零星的、孤立的研究阶段,而实际上,任何一个具体的场地与地基在一次地震中只可能有一个总体表现或总效应。因此,需要把各项涉及场地地基问题的课题用一个系统化的理论、观点和方法进行研究解决。近些年来,国际地震工程界日益普遍地认识到,工程结构与场地地基,是一个工程抗震的总体,两者相互制约,缺一不可。前者已有一定的基础,而后者则正在急起直追地力求充实、提高和系统化。

1.2 宏观震害的重复性——地震工程地质条件的决定作用

当我们对历史地震经验进行系统的总结时,常会发现这样一种规律:一个地区、地带、地段或地点在某次强烈地震作用下,不论是近场还是远场出现的震害,常会在其他一些强烈地震作用下重复出现,这就是所谓的震害重复性。例如:1679年9月2日三河县马坊地震($M \approx 8.0$),波及北京,历史记载德胜门、安定门、西直门城楼倒塌,“德胜门下裂一大沟,水如泉涌”。建于顺治八年的北海琼岛的白塔被这次地震摧毁。1976年7月28日唐山地震波及北京为6度。被保留的德胜门城楼,又出现了局部塌落的高烈度异常,在其邻近的某些建筑物,亦出现了非结构因素所致的异常破坏。北海公园的白塔及其邻近建筑物又遭损坏。天津市河东区毛条厂,位于海河旧河曲及其故道填土层上,在1967年3月17日河北省河间县地震($M=6.3$)波及下,厂址北侧多处喷水冒砂,40米高的砖烟囱在上部约1/3处被震断,砖石结构厂房在梁端墙角开裂,是河东区的较突出的高烈度异常点(约7度)。1976年7月28日唐山地震波及天津,河东区为9度异常。该厂在1967年3月17日河间地震($M=6.3$)时遭受过的震害在唐山地震时全部重现,只是程度上更为严重而已。重复性震害最突出的是一度在河间地震时被震断的砖烟囱,虽经重新修筑,并用拉筋箍加固,但并未阻止在原来部位再次震裂。该厂场地的喷水冒砂,不仅在1976年7月28日主震时再现,而且在其后的几次强余震(如1976年11月15日宁河 $M=6.9$ 地震;1977年5月12日宁河 $M=6.6$ 强

* 国家建委京津地区抗震办公室在1967年组织了地基抗震组。

余震；甚至在 1977 年 6 月 10 日丰南 $M \approx 5.3$ 余震)中，该厂虽仅轻微有感，但仍重现喷水冒砂现象。天津第二毛纺厂在唐山 7 月 28 日地震中被震倒的院墙，经修复后又于同年 11 月 15 日宁河地震($M=6.9$)时再次震塌。此外，唐山地震时，在丰南县钱家营矿区出现了严重的喷水冒砂，而不少冒砂口也在宁河地震时再度喷冒。这种现象在上述地震的其他地点，以及其他地震中屡见不鲜。

在国外，例如日本东京市西北及东京湾周围的一些地带，在下列几次强烈地震中都重复地发生液化：1894 年东京地震($M=7.5$)、1895 年利根下游地震($M=7.3$)、1923 年关东地震($M=7.9$)、西崎玉地震($M=7.0$)。同样，浓尾平野的液化点在几次强烈地震中亦均一致：1891 年浓尾地震($M=8.4$)时在名古屋市(伊势湾)西北三角洲地带发生的液化现象，又在 1909 年的江浓地震和 1944 年东南海道近海地震的波及下，再三地重复出现，且液化点的平面分布均甚一致^[6]。

总括说来，震害的重复性是一种超越震源机制、震中距离及地震烈度等各种外界因素影响的客观现象。尽管每次震害有程度上的差异，但其震害特征(地点、部位、破坏机理等)却基本上保持不变。这清楚地表明，震害的重复性主要取决于场地地基这些内在因素。因而要研究和抗御这种重复性震害，只能从地震工程地质着眼，并着手于处理各种内因问题，以及研究某些外因如何通过内因而起作用。

1.3 地震工程地质学的研究目的与任务

作为地震工程与工程地质学之间的边缘学科，地震工程地质学需要和可能承担着至少两个方面的研究任务：① 从工程地质条件联系到工程场地与建筑物地基，对其地震效应问题进行研究和评价，以确保各类工程抗震防护措施能建立在一个可靠的工程地质基础之上；② 从地震工程学科发展的需要出发，它应该广泛而深入地探索有关场地地基的地震动力学问题，包括岩土的基本动力性状和各种地质、地形条件组合下的各种动力反应问题，以提高地震工程学的探索能力和扩展其探索领域。下面拟就这些问题作进一步说明。

1.3.1 促进工程抗震效果

1.1 节概述的地震工程发展历程说明，场地地基的工程地质因素所以日益受到注意和重视，是因为任何工程设施都不可能脱离地壳而成为空中楼阁，所以在一次强烈地震运动中，场地地基一方面作为动力介质，将地震波加以不同形式的改变和不同程度的放大，并传递给各种工程设施；另一方面，场地地基又作为承托地面工程设施的基底，传递和接受下部地层震动和上部建筑回输的动能。前一种作用，决定着工程设施可能经受的地震荷载大小、震动历时长短和振动频率特征，这些都是工程抗震设计所必须考虑的重要因素。后一种作用，则在于能否确保地面工程设施建立在稳定可靠的工程地质基础之上。忽略任何一方面的考虑，都会使工程抗震设防陷入盲目性，其抗震设计难免是不合理的，其抗震效果更是难以保证的。国内外许多实际的教训可以充分说明这个科学规律，例如：日本新潟地震在该市广泛分布的信浓川冲积层上发生液化使全市受灾面积达 75%。在该河附近的公寓大楼建筑群正位于液化层上，由于场地严重喷水冒砂，大楼倾斜，其中最严重的一栋倾斜角度近 70°。这些建筑结构虽亦经抗震设计，但因地基失稳，全部工程终于失败。

1976 年 7 月 28 日唐山地震，宁河县遭受强烈的地震波及。在厚层软粘土场地上的宏观

震害,表现出十分奇特的现象:宁河县城全部大型砖筒水塔(200—300吨容量),筒身遭到彻底震毁;钢筋混凝土水箱倾覆并跌落在软土层中,彻底破碎。由此可见其地震惯性力极其巨大。然而就在其近旁(约隔20米远)的一座砖石结构三层办公楼,以及整砖下脚正规砌筑的单层砖房,均完整无损地保存下来(详见第七章)。但就在同一地区,阎庄大桥系一混凝土预制桥面板的大跨公路桥,在此次地震中,四跨的桥面板受震“飞跃”过了受震倾倒的桥台而叠落在一起。如果说这是强烈地震运动造成的,但这种地震运动并未导致阎庄大桥邻近正规建造的单层砖房(仓库及民房等)的严重破坏,相反地这些低层轻型建筑物上的屋顶烟囱均安然直立。从抗震性能来说,大型砖筒水塔和钢筋混凝土桥的抗剪刚度要比一般砖石结构的民用房屋为大,但是由于它们与场地厚层软土在振动频率特征上的耦合所构成的致命影响,而招致了这种毁灭性的共振破坏。

1.3.2 研究解决场地地基的地震动力学问题

在场地与地基的地震动力学研究中,有两种不同实质的估量方法,一种是以宏观现象为基础的烈度法,另一种则是以仪器微观实测地震运动参数为基础的动力反应分析法。另外,在研究对象上,定性的方法多用于概括一定震区范围以内的一般性规律,而定量的方法则仅限于地层内部或表面上某一点的动力性状或运动状态。这样在理论与实践上就遇到下列一些有待解决的矛盾。

1. 宏观与微观的矛盾

地震烈度是根据宏观震害调查确定的。所谓宏观震害是指地震区的全部地震现象,包括建筑的受损情况、地表现象和自然景观的改变、器物的受震表现、以及人的感觉和反映等普遍现象。

目前国内外大多数工程抗震规范都根据不同的烈度来估计地震对工程设施的可能影响,进而采取相应的抗震措施。因此,地震烈度在工程抗震上是一项极其重要的指标。然而在地震动力学理论上,各种地上或地下建筑物在一次地震中经受了多大的地震力(荷载),应该是根据地震仪的微观实测记录,计算建筑物及其地基的加速度反应来确定的。我们常可发现这样的矛盾,即在烈度较高地区的建筑物实际所受地震荷载(或加速度)并不一定相应地较大,甚至有相反的情况,如1971年美国圣费尔南多地震震中区烈度虽高达11度,但其震级却很小($M=6.6$)。这是因为:

(1) 地震荷载是个客观的物理量,而地震烈度则是人们主观上对于宏观震害的描述,其中缺乏客观的定量标准。至今我国的12度烈度表以及国际上通用的麦加利12度烈度表,或日本的八等七度烈度表等,仍以宏观现象作为划分标准。但烈度高时,其地震力并不能肯定就大,因为建筑物的破坏不一定是地震力直接作用的结果。

(2) 烈度的确定是属于地震工程研究范畴的事。在烈度的划分标准上,以及实际烈度的调查中,往往不可能严格区分不同结构类型的建筑物在地震运动中所表现的不同性状,也难以具体区分处于不同发育阶段的地质现象在其自身构成宏观震害上的实际差异,而常常是把不同实质的宏观震害归纳在一起,用烈度表上的某一标准加以概括。这样确定的烈度值,常是由那些刚度与强度不足,或本来就濒于毁坏、失稳的建筑物,以及场地地基条件,起着控制作用。

(3) 根据微观实测或统计成果,以最大水平地震加速度来计算地震荷载,尽管在理论上是严密的,但它也不能全面地概括一次地震运动对建筑物产生的全部影响;如前所述,建筑

物遭受的震害并不完全是，甚至有时完全不是由地震力直接造成的，而微观的实测又随测点的具体部位、仪器的性能（灵敏度和高低频失真）等多种因素而变。所以，这种微观的定量方法不可能与宏观的定性方法在实际效果上完全一致。

尽管上述问题产生条件是复杂的，而且需要从多方面研究和处理，但有一点是必须明确的，即宏观与微观上的差异中蕴藏着不可忽视的地质地形因素，脱离这种因素来寻求问题的答案是不可能的。

2. 烈度分布上的“正常”与“异常”的矛盾

众所周知，烈度的分布一般随着震中距的增加而递减，因此我们可以用等震线来概括一定地面范围内的地震烈度。然而，几乎在所有的地震宏观调查中，我们都可以发现烈度正常分区中存在着异常区。高烈度异常有时被视为“危险区”，低烈度异常有时被当作“安全岛”。这种异常区的出现似系偶然，实属必然，因为它往往是各种地质地形因素在一定的地震条件下（包括震源机制及各项地震参数）的综合反映。不过由于因素的多重性和条件的复杂性，往往不易被察觉究竟是哪种地质地形因素在何种条件下起着决定性作用。这种错综复杂的因素以及它们在烈度的正常分布中所表现出来的异常效果，正是地震工程地质学所必须解决和可能逐步解决的问题。

3. 静力计算与动力解析的矛盾

地震对工程设施的影响主要是动力学范畴的问题，而建筑物及其地基基础的抗震设计，主要是具体估计它们所受的地震力及其相应产生的运动的性状（包括运动形式及反应谱所表现的各项特征），据此采取相应的抗震措施。

在生产实践上，目前国内外很多抗震规范大多沿用着所谓地震荷载的简化计算方法，即将地震运动对建筑物产生的最大水平推力（地震惯性力）和倾覆力矩按照静力作用计算其基底最大剪力和最大弯矩。为了使计算更接近于实际的地震动力作用，近年来国内外一些规范作了重大的改进，即根据实测或实际的建筑结构的动力特性（周期、阻尼及振型等），及其与地基的加速度反应，建立周期与地震动力特征值（如地震加速度或地震影响系数等）的某种函数关系，并绘制出代表性的曲线即反应谱，借以确定在一定地基条件和一定周期特性下的预计地震加速度值，进而确定水平地震力。至于竖向地震力，一般只作为建筑物在竖向地震加速度作用下产生的附加重力，而且这种计算仅对于那些依靠其自重来保持其自身稳定性的建筑（如重力式挡墙、重力坝等），才是必要的。

上述这些计算方法实质上是将地基所受地震动力问题作类似静力的计算，或在静力计算上再加以某些动力因数的修正，即所谓动力解析。

然而建筑地基的计算在地震动力学和结构静力学上有着不同的概念和范畴；在地基静力计算中，我们通常可以根据“主要受力层”或“压缩层”的概念，来考虑基础下方的地基变形或稳定性问题。而在地震动力解析中，“地基”则不能局限于上述的平面分布和空间范围，我们应该把整个建筑物周围的地层，特别是整个工程场地的地表层（包括基础底面以上的地层）都作为“地基”看待，因为它们在一次地震中是与建筑物协同作用的。这样一来，在动力解析中，建筑场地与建筑地基两者并没有明确的分界，因此在地基静力计算中一般不予过问的场地地质地形条件，在动力解析中就成为必须考虑的因素。这些问题也是地震工程地质学的研究对象之一。

4. 局部与整体的矛盾

我们在强烈地震的震中区，还可以经常见到在地质地形条件基本相同的地区上震害往往还会有轻重之分，并呈条带状相间出现的宏观现象。这种现象可称之为地表震害的节律性变化。如果我们把眼界缩小到一个小面积的局部场地或地基，则这种节律性的震害轻重变化就渐趋淡薄，因为地质地形条件是一致的。所以全区性的震害异常与地质条件一致性之间，看来有时存在着矛盾。这种矛盾既不能通过地层中或地表上的某个质点的运动性状或动力反应来解决，也无法用该点上的动力条件去表征其规律。这就需要用地震工程地质学的观点研究整个地区或场地在一次地震运动中的整体表现和局部特征，以便在采取抗震措施中相应地考虑这种作用可能招致的后果。

1.4 地震工程地质研究中的若干主要方面

建筑场地地基与上部建筑物二者在一次地震运动中如何相互影响、相互制约，又相互协同作用，这是地震工程地质工作必须研究并力求作出正确评价的问题。具体说，地震工程地质在研究场地地基对建筑物抗震效能的影响及其相互关系问题上，主要有以下几个方面：

1.4.1 地表不连续变形问题

这里所谓地表不连续变形，是指由地震引起的地表基岩断裂、第四系地裂、地震滑移及山岩崩塌等。这些破坏性物理地质现象的出现，往往导致一个场地上的工程设施遭受整体性的损毁。它们的产生，是随地震能级、震源机制、地面运动特征及其强烈程度，以及场地的地质构造、地层结构、岩性产状要素、土质条件、地下水埋藏条件等因素的变化和它们的不同组合而异。

由于地表不连续变形在规模上和能量上有时至为巨大，非一般的结构抗震措施所能抵御，因此一般采取避开此种危险地段的原则，而不是留待结构抗震设计中去处理。这样，地震工程地质工作就必须将与上述问题有关的岩土力学和地质力学因素逐个地加以分析，以便对每一种地震物理地质现象的发生和发展作出具体的判断。

1.4.2 地面运动问题

地震对工程设施的具体影响，总是首先通过地面运动，尤其是工程设施周围的地面运动产生影响的。这里所谓的地面运动是指地震运动在某个局部（如建筑场地或地基）范围内的具体表现。地震工程中常以运动的幅值（加速度，或速度、位移）、频率特性及振动（周期）历时长短来表征其性状，而这些物理量又取决于地层结构、地形与地质条件，以及地震能级、震源机制、震波传递途径及其通过介质层的动力特性等综合影响。这些影响在总的效果上就决定着工程设施所经受的地震强度（力的大小）、振动频率特性和震动持续时间，以及局部地段上运动的激化或衰减规律，从而决定着工程设施在地震中的“命运”。

地震工程地质工作就需要分析与判定这些因素内在的联系和外表上的反映，然后设定适当的模式或模型，借以对地面运动作出定性或定量的估计。

1.4.3 场地地基与建筑物的协同作用问题

现有地震工程理论已经从质点系的动力反应方面着手研究地基与上部结构物的协同作用，然而宏观震害经验表明，地震中建筑物与其周围场地地基表现为两位一体的运动。两者不仅在振动性状上成为统一体，而且整个振动过程中或在更大范围的场地地震运动过程中，又互为因果地彼此影响着，其中突出表现为三种形式：

1. 共振或类共振破坏

当地基由多层岩土组成时,各层振动周期由于土质岩性不同而异,但成层地基作整体振动时,则系由表层岩土起主导作用的一种综合性周期(即所谓卓越周期,详见第8.1节)所决定。当建筑物的固有周期与地基的卓越周期相等或相近时,两者就会产生共振或类共振,从而大大增加了振动幅值和时间,致使建筑物破坏。

严格说来,理想的共振现象是不容易出现的,因为由于地基与上部结构物的相互作用,两种周期在建筑物兴建之后都将发生一些变化,所以大量的震害实例还是由于两种周期接近一致而产生的类共振破坏所致。

2. 能量互递及消散

地震运动总是经由地基传递到建筑物的。建筑物在获得地基传递的动能之后,开始以其特定的振动性状(包括振型及振动参数)运动着,与此同时,建筑物对其地基来说又是一个相对的次生震源,把振动送回到地基,即所谓“能量反馈”。而地基土质条件和成层条件(如岩土的物质成分及其结构特征所表现的弹性、塑性和粘滞性大小,以及刚度与强度特征等)又决定着其接受反馈能量的程度,即所谓地基(对建筑物振动)的能量逸散性。这种特性反过来又影响建筑物的振动阻尼、衰减、耦合振动周期及振动历时长短,从而决定着建筑物的耐振能力。就场地地基本身的地震运动而论,也存在着能量消散问题。在本书第3.5节中,我们将会看到地震可能引起大规模构造性地裂,它本身虽然是一种明显的震害,但是它的出现却会使地面振动能量逸散,从而缩短地震历时,使其临近的工程设施免于毁灭。

3. 大面积的场地地震波动对建筑物的影响

当前在地震工程中,对于地基与建筑物的动力协同作用的分析,只是把地基当作由均质的和各向同性的质点组成的地质体。但是通过宏观调查可以发现在很多情况下,地面工程设施的震害是与很大面积上的场地破坏形式和程度完全一致的,关于这些现象本书后面的有关章节将有所论述(例如液化宏观形迹,地面节律性破坏等课题)。这表明,局部的地基及其上建造的范围有限的建筑物,在一次地震波及中将受大面积场地地震运动的控制和影响,犹如水中荡舟而取决于水浪强弱那样。所以,实际上的协同作用是一个庞大的地质体与其上或其中的工程设施两者共同参与和经受着一场地震的波动。决定这个大规模波动的因素则主要是地质、地形与地貌条件。如何将多种条件因素纳入到一个场地上,并与其工程设施的地震反应一併考虑,这是个需要解答的课题。

上面列举的一些问题都是边缘性的课题。在作具体估价方面,不少问题还有待探索解决的途径。在这方面,地震工程地质工作可以首先从场地与地基条件,定性评价其对建筑结构的影响,为抗震设计提供背景资料。

1.4.4 场地地基抗震性能的改变问题

在地震作用下,地基岩土的物理力学性质可能发生根本性的变化,以致地基失效而导致其上建筑物的破坏。这种现象在地震灾区是极其常见的。

地基的受振失效通常主要表现在两方面:

1. 强度降低而失稳

在土力学中所谓稳定性是指由抗剪强度维持的在非极限状态下的力学平衡。在地震的作用下,由于土体承受了瞬时的过大地震荷载,或由于土体本身强度的瞬时降低,或者两者同时兼有,都会使地基失稳。

地基失稳常见的典型之一就是砂土液化。一般来说,这是由于透水性较弱的饱和松散粉细砂或低塑性土在受震时结构增密,其孔隙水在瞬时内难以及时排出而承受了外加荷载,致使孔隙压力部分地甚至全部地取代了颗粒骨架间的有效压力,于是土的抗剪强度瞬时内急剧降低或消失。此外斜坡地基的滑移也是失稳的主要形式之一。

2. 过量震陷或差异震陷

尽管地基所受竖向地震荷载是较小的和短暂的,从理论上说似乎不会导致过大的附加沉陷。然而实际上这种类型的震害往往是多种因素综合作用的结果。例如,在半挖半填地基或其他成层条件复杂的地基中,过量震陷往往是与地基滑移相伴产生的。只有松散的无粘性土地基在建筑物产生附加的地震荷载作用或土层自重引起的地震力作用下,才容易产生明显的震陷变形。这些情况在国内外宏观震害中不乏其例。

本章作为地震工程地质学的一篇绪言,在此仅能略举有关这一边缘学科的若干课题。本书后面几章将专门讨论它们的某些具体内容。但须指出,这门学科现在仅处于启蒙阶段,有关理论尚待今后不断充实和提高,并使其更加准确有效地指导工程抗震实践;有关方法也需要不断加以改进,使其便于付诸实用。地震工程地质学的建立不仅应该和可能从工程地质以至岩土工程角度补充和加强整个地震工程学的内容和效能,而且还必须直接或间接地减少工程建设可能遭受的地震损失。这种预期的效果是完全可以指望的。美国加利福尼亚州曾有专家做过这样的估计^[7]:该州在1970年到2000年间,由于地震造成的损失将达21亿美元。如果采取抗震措施,只需投资其10%即2.1亿美元,即可将上述由地震造成的损失减少50%,即10亿美元,所以其收益比率是5。如果我们再进一步估计,用于地震工程地质研究和处理的费用约占整个工程抗震措施的1/15—1/10,只要用1.4—2.1千万美元,则可将上述损失保持在更低的水平,所以其收益比率至少可达50—75倍。我们姑且不论这种估计是否具有普遍意义,但可确信,地震工程地质工作在减少地震灾害及其损失方面的作用将是不可低估的。

参 考 文 献

- [1] Wood, H. O. (1908), "Distribution of Apparent Intensity in San Francisco Earthquake", Report of the State Earthquake Investigation Commission.
- [2] 金井清 (1949), «非木造建物の震害と地盤の性質との関係» 東大震研彙報 No. 27.
- [3] 茅原一也 (1964), «新潟地震被害の分佈、被災地と地盤との関係» 新潟地震災害復興計画 1964.
- [4] Scott, R. F. (1965), "Soil Mechanics and Foundation Engineering Aspects of the Alaskan Earthquake of March 27, 1964", Proc. 3rd WCEE Vol. I 1965.
- [5] Seed, H. B., Idriss, I. M. (1971), "The Simplified Procedure for Evaluation of the Liquefaction Potential of Sand", J. SMFE, ASCE, Vol. 97 No. 9.
- [6] 栗林、龍岡 (1974), «本邦における地震による地盤液状化地図» 第11回災害科学討論会 (日本).
- [7] Slosson, J. E., Amimoto, P. Y. (1974), "Geological Investigation for Aseismic Design", Proc. 12th Ann. Eng. Geol. Soil Eng. Symp. IDAHO. U.S.A.

第二章 波动、地面运动及地震烈度

本章作为后面各章所述内容的理论前提,拟重点论述有关地震工程地质的一些基本理论与概念。

2.1 波 与 波 动

地震引起的介质振动正如任何其他弹性介质的振动一样,是以波的形式从震源向地球的各个方向传播的,所以要研究地球上任一地点所受地震影响的大小,必须首先要了解地震是以什么样的波,通过怎样的波动形式传递到该地点上,然后才能进一步分析波动在该地的具体地质地形条件下又产生了怎样的变化。这就是我们通常所说的地震反应。

应该指出,地震波传播过程和场地的地震反应是十分复杂的。由于地壳(特别是工程设施所直接依赖于其上的地壳表层)是十分不均匀的和各向异性的,所以波的类型及波动的形式是多种多样的。

2.1.1 波的类型及其运动形式

人们对波的认识主要是从两方面着眼的,一是从波的传播方式,另一是从波的力学属性。根据前一种识别方法,波可分为① 体波——通过介质体内传播的波;② 面波——通过介质表面或界面传播的波。根据后一种识别方法,波又可分为:a. 压张波——波动介质质点在一次循环振动过程中相继受压和受拉;b. 剪切波——相邻质点在传递振动过程中受往复的剪切作用;c. 扭剪波——介质质点在传递振动过程中受水平或垂直的扭力作用,而这种水平扭摆或垂直摇摆都是在界面上由剪切波产生的偏振波。现将各种波分述如下。

1. 体波

体波按其传播介质质点运动的特征,通常可分为纵波与横波两种。

(1) 纵波(P波)

这种波在介质体内传播时,其质点振动方向与波的传播(前进)方向一致,因此质点间的弹性相对位移必然是紧松交替,或者说压缩与拉张相间出现,周而复始。所以这种波也可叫做压缩波或疏张波,或简称疏密波。

纵波的特征示于图 2.1。图中用 12 个质点代表介质体在传递纵波时的受力和相对位移(变形)情况。姑以第③、④两个质点为例,在时间 t 为波动周期 T 的 $0, 1/4, 1/2, 3/4, 1$ 及 $5/4$ 时,相继由静止转为压缩 $\oplus$ 和拉伸 $\ominus$ 。直到 $t=T$ 时由第①点开始恢复原位。如果没有阻尼影响和能量损失的话,就循环往复地按此规律运动下去。从图中的第①质点的运动轨迹可见,它在做简谐振动,其波形为正弦型或余弦型。

由于任何一种介质(固态、气态、液态)都可以承受不同程度的压缩与拉伸变形,所以纵波可以在所有这些介质中传播。这是纵波的一个重要特性。

由于纵波在传播过程中使介质质点产生压张变形(位移),所以在每周期的振动中都不可避免地要在介质内部产生符号交替变换的法向应力。这种波动应力对于以有效应力为主导的土体强度来说,有时是一项不可忽视的影响因素。

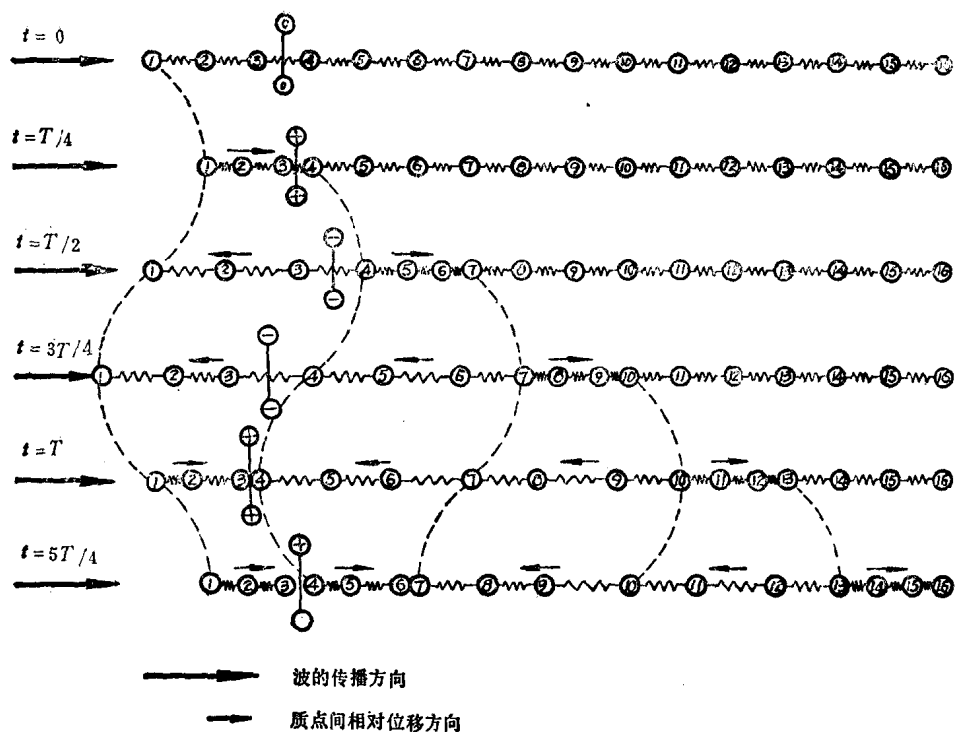


图 2.1 纵波运动特征示意图

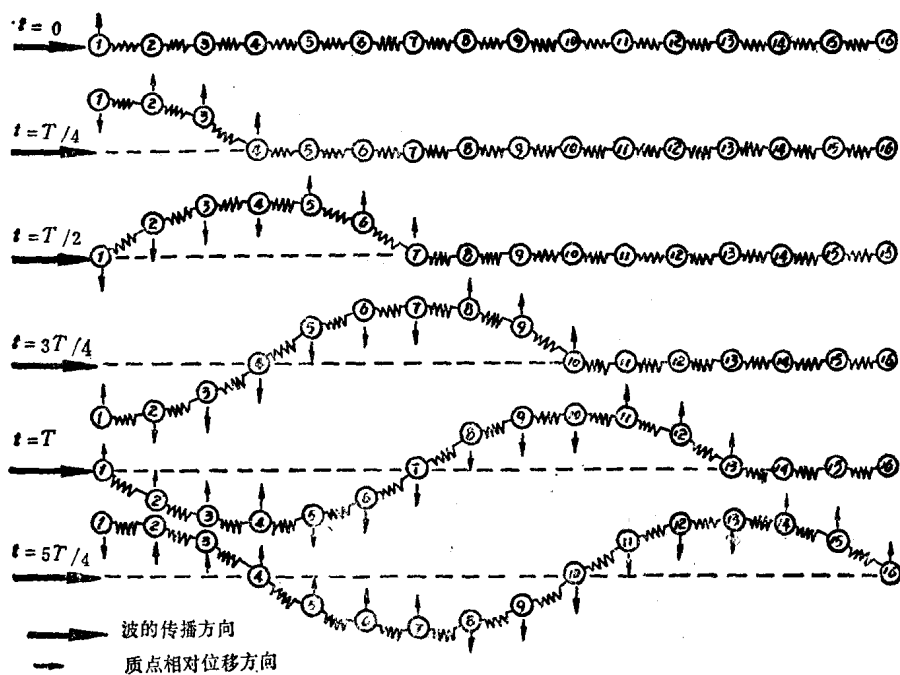


图 2.2 横波运动特征示意图

(2) 横波(S波)

这种波在介质体内传播时,质点的运动方向与波的前进方向正交,因此相邻质点不可避免地产生往复的剪切位移,或者说两质点间承受着剪切作用而发生剪切变形。图 2.2 为横波运动特征示意。从图中可以看出,横波的传播过程就是介质质点不断地受剪变形的过程,这种变形是在介质不产生任何体积压缩或膨胀条件下进行的,所以它是一种弹性等容剪切变形。这是横波的一项特征。

由于横波在传播过程中完全依赖于介质抗剪刚度,所以它只能在固体介质中传播,而液态与气态介质不能承受剪切作用(理论上抗剪刚度为零),横波难以通过。这是横波的另一重要特性。

横波对介质体的剪切作用,如果发生在两层不同刚度的介质的界面(层面)上,就会引起界面两侧质点之间的特殊位移,即所谓剪切波的偏振作用。其结果就产生了两种偏振的波,一是剪切波的垂直分量(SV波),另一是剪切波的水平分量(SH波)。这是横波的第三个重要特性。有关这两种偏振分量的特征,后面将具体论述。

2. 面波

面波是指沿着介质表面(地面)传播的波。在地震研究中,它是指体波经地层界面多次反射形成的次生波。这种波动实质上是分别以垂直分量和水平分量单独地传播,所以在半空间表面实际上存在着两种波的运动,即瑞利波与乐夫波。

(1) 瑞利波(R波)

这是瑞利(L. Rayleigh, 1885)发现的一种地表面波,因而得名。他认为在弹性半空间表面有可能得出波动方程(2.1.2节)的第三个解,它是仅限于半空间界面附近的一个有限区域内运动的波。

瑞利波的特点是在传播的介质体内,质点的运动仅限于在波的前进方向与自由界面法线方向组成的平面内,其运动轨迹则为一椭圆,其运动方向则呈逆行的椭圆运动。但其椭圆的形状又随质点距自由表面的深度而定。即椭圆上任一点位置上的水平分量 $u(z)$ 与垂直分量 $w(z)$ 分别为^[1]:

$$\begin{aligned} u(z) &= -\exp[-0.848(zN)] + 0.577 \exp[-0.393(zN)], \\ w(z) &= 0.848 \exp[-0.848(zN)] - 1.47 \exp[-0.393(zN)]. \end{aligned} \quad (2.1)$$

式中: z 为质点所在深度的坐标; N 为波数, 其定义为 $N = \frac{2\pi}{L_R}$ (L_R 为波长)。将式(2.1)

描成曲线, 即如图 2.3 所示, 其中 ν 为泊松比。如将此两分量加以组合, 则其质点运动将随深度的增加而变化, 如图 2.4 所示。这种波的特点是振幅大而逆行于波的前进方向, 其作用犹如水面的浮叶颠簸一般。因此, 在震中区出现的这种以垂直运动为主的波危害常较体波为大。但是它的产生是由震源出射的 P 波和 S 波经界面折射而成, 所以它会发生发生在距震源为

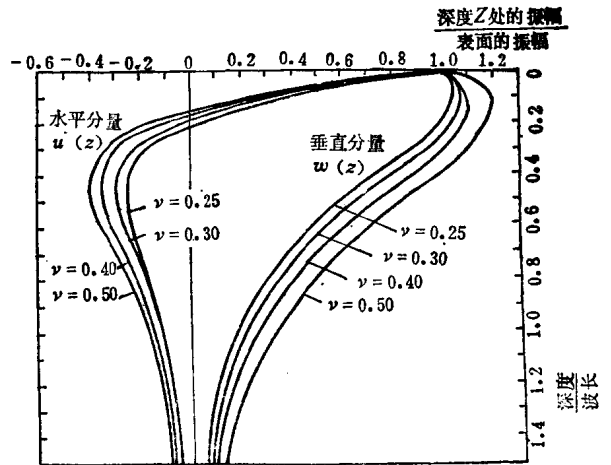


图 2.3 瑞利波的振幅比随深度的变化曲线
(根据小理查特, 1970)