

第八章 不良地质作用和地质灾害的勘察

本章重点: 本章介绍了不良地质作用和地质灾害的基本知识, 包括岩溶与土洞、崩塌和滑坡、泥石流、场地和地基的地震效应。重点为不良地质作用和地质灾害的勘察要求。

学习要求: 通过学习, 要明确不良地质作用和地质灾害的形成条件、类型和特点, 掌握勘察要点及方法, 并结合实际预测其危害并提出预防和处理的措施, 保证工程建筑和生命财产的安全。

第一节 岩溶与土洞

一、概述

岩溶又称喀斯特 (Karst), 指地表中可溶性岩石 (主要是石灰岩) 受水的溶解而发生溶蚀、沉淀、崩塌、陷落、堆积等现象形成各种特殊的地貌, 如石芽、石林、溶洞等, 这些现象就总称为岩溶地貌。喀斯特是南斯拉夫西北部一个石灰岩高原的地名, 19 世纪末, 南斯拉夫学者司威杰 (J.Cvijic) 首先对该地区进行研究, 并借用喀斯特一词作为石灰岩地区一系列作用过程的现象的总称, 到 1966 年我国第二次喀斯特学术会建议将“喀斯特”一词改为“岩溶”。所以, 喀斯特地貌亦称岩溶地貌。

岩溶地形的地面往往是石骨嶙峋、奇峰林立, 地表崎岖不平, 地下洞穴交错, 地下河发达, 有特殊的水文网。我国石灰岩分布面积约有 130 万平方公里, 广西、贵州等省都有典型的岩溶地貌。我国的岩溶无论是分布地域还是气候带, 以及形成时代上都有相当大的跨度, 使得不同地区岩溶发育各具特征。但无论是何种类型岩溶, 其共同点是: 由于岩溶作用形成了地下架空结构, 破坏了岩体完整性, 降低了岩体强度, 增加了岩石渗透性, 也使得地表面强烈地参差不齐, 以及碳酸盐岩极不规则的基岩面上发育各具特征的地表风化产物~红粘土, 这种由岩溶作用所形成的复杂地基常常会因为下伏溶洞顶板坍塌、土洞发育大规模地面塌陷、岩溶地下水的突袭、不均匀地基沉降等, 对工程建设产生重要影响。在岩溶地貌地区, 地表水系比较缺乏, 影响农业生产。近年来, 我国岩溶地貌的许多地方开辟为旅游胜地, 如广西的桂林山水、云南的路南石林甘肃武都的万象洞等都很有名。

土洞是岩溶地区的一种特殊的不良地质现象, 是覆盖型岩溶区在特定的水文地质条件作用下, 基岩面以上的部分土体随水流迁移携失而形成的土洞和洞内塌落堆积物, 并引起地面变形破坏的作用和现象。

土洞对地面工程设施的不良影响, 主要是土洞的不断发展而导致地面塌陷, 对场地和地基都造成危害。由于土洞较之岩溶洞穴来说, 具有发育速度快, 分布密度大的特点, 所以它往往较溶洞危害大得多。土洞及由此引起的地面塌陷严重危害工程建设安全, 是覆盖型岩溶区的一大岩土工程问题。

岩溶场地可能发生的岩土工程问题有如下几个方面:

(1) 地基主要受压层范围内, 若有溶洞、暗河等存在, 在附加荷载或振动作用下, 溶洞顶板坍塌引起地基突然陷落。

(2) 地基主要受压层范围内, 下部基岩面起伏较大, 上部又有软弱土体分布时, 引起地基不均匀下沉。

(3)覆盖型岩溶区由于地下水活动产生的土洞, 逐渐发展导致地表塌陷, 造成对场地和地基稳定的影响。

(4)在岩溶岩体中开挖地下洞室时, 突然发生大量涌水及洞穴泥石流灾害。从更广泛的意义上, 还包括有其特殊性的水库诱发地震、水库渗漏、矿坑突水、工程中遇到的溶洞稳定、旱涝灾害、石漠化等一系列工程地质和环境地质问题。

二、溶蚀作用

(一) 溶蚀作用机理

溶蚀作用是指水通过化学作用对矿物和岩石的破坏作用。化学作用主要有溶解、水解、水合、碳酸化及氧化等。其中水对可溶岩的溶解和水解十分普遍, 即使在纯水中, 一部分水分子也常离解成 H^+ 离子和 OH^- 离子, 使水具有酸性或碱性反应, 其化学活动性很强。 OH^- 离子很容易夺取盐类矿物中的 K^+ , Na^+ , Ca^+ 和 Mg^+ 等阳离子, 促使矿物结构破坏, 分解为单个离子或分子扩散于水中。实际上自然界中的各种水体如雨水、河、湖或地下水都不是纯水, 而是含有酸类如碳酸、硫酸、硝酸等的水溶液, 它们都会加速岩石的破坏, 特别是碳酸对石灰岩的碳酸化作用就更为普遍。原因是大气中的 CO_2 与水化合后即成为碳酸:



碳酸电离后产生 H^+ 和 HCO_3^- 离子即:

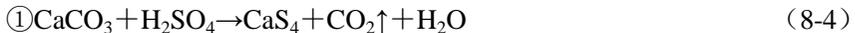


当 H^+ 与石灰岩 ($CaCO_3$) 作用时, H^+ 从 $CaCO_3$ 中离解出 CO_3^{2-} , 结合成 HCO_3^- , 从而分解出 Ca^{2+} , $CaCO_3$ 也就溶解于水即:



可溶岩的溶蚀结果: 一是所有组分全部溶解, 即称为“全溶解”, 例如对质纯的石灰岩溶解; 二是只有部分组分溶解, 称为“不全溶解”, 如对含有杂质的石灰岩溶解, 包括泥质石灰岩、硅质石灰岩和铁质石灰岩等。不溶或难溶的物质会残留在岩石表面或裂隙中, 阻碍溶解作用。

此外, 由硫化铁氧化时产生的硫酸, 生物活动或死亡后分解而产生的有机酸, 闪电时产生的二氧化氮溶于水后形成的硝酸等强酸类, 对石灰岩都会产生强烈的溶蚀, 如式:



(二) 影响溶蚀作用的主要因素

溶蚀作用能否进行及其溶蚀速度主要受水的溶蚀力、岩石的可溶性及岩石的透水性等因素影响。

1. 水的溶蚀能力。

水的溶蚀力取决于水的化学成分、温度、气压、水的流动性及流量等方面。

(1) 水的化学成分。水含酸类是岩石溶蚀的关键, 而酸的含量多少则影响岩石的溶蚀速度, 酸的含量越高, 溶蚀力也越强。酸的来源除了少部分来自矿物的分解和生物活动而直接产生之外, 大多数是由大气中的 CO_2 溶入水中而成, CO_2 对岩石的溶解起着重要作用。

(2) 水的温度。水中 CO_2 的含量与温度成反比，一般温度越高， CO_2 的含量越少，温度越低， CO_2 的含量越多。温度高的水， CO_2 的含量虽然减少了，但水分子的离解速度加快，水中 H^+ 和 OH^- 离子增多，溶蚀力反而得到加强。据测验气温每增加 10°C ，水的化学反应速度增加一倍，故高温地区的岩溶速度较快。

(3) 气压的影响。气压会影响水中的 CO_2 的含量，一般大气中 CO_2 的含量占空气体积的 0.03% ，因此在自由大气下，空气中 CO_2 的分压力 $P_{\text{CO}_2} = 0.0003$ 大气压。水中 CO_2 的含量与气压成正比，在温度条件不变的情况下，局部分压力越高，水中 CO_2 的含量也越多， CaCO_3 的溶解度也越大。

(4) 水的流动性及流量。经常流动的水体，能较大地提高水的溶蚀力，原因：①流动的水处于开放系统，从降水(补给)~地表水及地下水(流动)~排泄过程中，水经常与空气保持接触，能不断地补充因溶蚀岩石所消耗的 CO_2 ，使水体不易达到饱和。由于地球上的热带、亚热带地区雨量多，雨期长，水流量大和水的循环快，加上气温高及生物作用强，所以 CaCO_3 溶蚀量比其他降水量少的寒、温带与干旱地区大。②处于流动状态的水，有时虽然达到饱和，但当几种不同浓度的饱和溶液混合后，可变为不饱和而重新获得溶蚀能力，这种混合溶液的溶蚀现象有三种：一是温度相同，但 CaCO_3 含量不同的两种饱和溶液混合，变成不饱和溶液的溶蚀，称为“浓度混合溶蚀”；二是 CaCO_3 含量相同，但温度不同的两种饱和溶液，混合变成不饱和溶液的溶蚀，称为“温度混合溶蚀”；三是海岸带的淡水与咸水混合，由于海水渗入，使混合水中的镁离子大增，当它的含量增加到大于 10% 时，造成异离子效应，从而提高钙离子的溶解度，使混合水溶蚀石灰岩。如墨西哥的尤卡坦，测得混合水对石灰岩的溶蚀力为 120 毫克/升，我国海南岛岸礁及南海珊瑚礁岛上的“礁塘”地貌，其生成亦与此有关。此外有些 CaCO_3 饱和溶液，因温度降低，使 CO_2 含量增加而变为不饱和溶液的溶蚀，称为“冷却溶蚀”。

2. 岩石的可溶性。

岩石的可溶性是岩溶地貌发育的最基本的物质条件，可溶性主要取决于岩石的化学成分与岩石结构。可溶岩按化学成分可分为三大类：即卤盐类如钾盐、石盐；硫酸盐类如硬石膏、石膏、芒硝等；碳酸盐类如石灰岩和白云岩等。在三类岩石之中，溶解度最大的是卤盐类，其次是硫酸盐类，最小是碳酸盐类。但地球上卤盐类和硫酸盐类岩石分布不广，厚度小，加上溶解速度快，地貌不易保存，故地貌意义不大。碳酸盐类岩石溶解度虽小，但分布广，岩体大，地貌保存较好，所以最有地貌意义，世界上绝大多数岩溶地貌都发生在该类岩石中，特别以石灰岩为突出。

但碳酸盐岩类中，又因 CaCO_3 含量不同而溶解度也有较大的差别。一般来说， CaCO_3 的含量越高，其他杂质（如 MgO 、 Al_2O_3 ， SiO_2 ， Fe_2O_3 等）含量越少的岩石，其溶解度就越大。因此碳酸盐岩石的溶蚀强度顺序为：质纯的石灰岩 > 白云岩 > 硅质石灰岩 > 泥质石灰岩。

岩石的结构与溶解度有密切关系，试验表明，结晶的岩石，晶粒越小，溶解度也越大，隐晶质微粒结构的石灰岩相对溶解度为 1.12 ，而中、粗粒结构为 0.32 ，比前者少 2.5 倍。此外，不等粒结构的石灰岩比等粒结构石灰岩的相对溶解度大。

3.岩石的透水性。

岩石的透水性对岩石的溶蚀速度和地下岩溶的发育有着重大影响。透水性不良的岩石，溶蚀作用只限于岩石表面，很难深入岩石内部。透水性好 的岩石，地表和地下溶蚀都很强，地貌发育也好。透水性强弱取决于岩石的孔隙和裂隙大小和多少。按孔隙及裂隙的生成先后，可分出原生透水性 与次生透水性二种，其透水性能差别较大。

原生透水性指在成岩时生成的孔隙及裂隙与其所产生的透水性能。在碳酸盐岩石中，除由生物遗体造成的岩石（如白垩岩、珊瑚礁）孔隙度较大（孔隙度 40%~70%）之外，一般结晶的石灰岩孔隙度都很小，只在 3% 以下，所以透水性都较弱。

次生透水性指岩石生成后，由于构造运动、风化和侵蚀作用而成的裂隙所产生的透水性能。其中由构造运动形成的张裂隙、断层裂隙和减荷裂隙等对透水性影响最大，它们明显地控制着岩石的透水性。此外，溶蚀作用本身也不断地改变着次生透水性，例如由溶蚀所成的管道、洞穴和溶隙等地貌，它们极大地扩大了透水空间，增加了透水性，从而加强了岩石的溶蚀。这是地貌结果对地貌作用的一种正反馈。相反，如果堆积作用加强，透水空间缩小，透水性则受到削弱，造成了一种负反馈。

三、土洞与潜蚀

土洞因地下水或者地表水流入地下土体内，将颗粒间可溶成分溶滤，带走细小颗粒，使土体被掏空成洞穴而形成。这种地质作用的过程称为潜蚀。当土洞发展到一定程度时，上部上层发生塌陷，破坏地表原来形态，危害建（构）筑物的安全和使用。

（一）土洞的形成条件

土洞的形成主要是潜蚀作用导致的。潜蚀是指地下水流在土体中进行溶蚀和冲刷的作用。如果土体内不含有可溶成分，则地下水流仅将细小颗粒从大颗粒间的孔隙中带走，这种现象我们称之为机械潜蚀。其实机械潜蚀也是冲刷作用之一，所不同者是它发生于土体内部，因而也称内部冲刷。如果土体内含有可溶成分，例如黄土，含碳酸盐、硫酸盐或氯化物的砂质土和粘质土等、地下水流先将土中可溶成分溶解，而后将细小颗粒从大颗粒间的孔隙中带走，因而这种具有溶滤作用的潜蚀称之为溶滤潜蚀。溶滤潜蚀主要是因溶解土中可溶物而使土中颗粒间的联结性减弱和破坏，从而使颗粒分离和散开，为机械潜蚀创造条件。

（二）土洞的类型

根据我国土洞的生长特点和水的形式，土洞可分为由地表水下渗发生机械潜蚀作用形成的土洞和岩溶水流潜蚀作用形成的土洞。

1.由地表水下渗发生机械潜蚀作用形成的土洞，这种土洞的主要形成因素有三点：

（1）土层的性质

土层的性质是造成土洞发育的根据。最易发育成土洞的土层性质和条件是含碎石的亚砂土层内。这样给地表水有向下渗入到碎石亚砂上层中，造成潜蚀的良好条件。

（2）土层底部必须有排泄水流和土粒的良好通道

在这种情况下，可使水流挟带土粒向底部排泄和流失。上部覆盖有上层的岩溶地区，上层底部岩溶发育是造成水流和土粒排泄的最好通道。在这些地区土洞发育一般较为剧烈。

(3) 地表水流能直接渗入土层中

地表水渗入土层内有三种方式：第一种是利用上中孔隙渗入；第二种是沿土中的裂隙渗入；第三种是沿一些洞穴或管道流入。其中以第二种渗入水流造成土洞发育的最主要方式。

2. 由岩溶水流潜蚀作用形成土洞

这类土洞与岩溶水有水力联系，它分布于岩溶地区基岩面与上复的土层（一般是饱水的松软土层）接触处。

这类土洞的生成是由于岩溶地区的基岩面与上复上层接触处分布有一层饱水程度较高的软塑至半流动状态的软上层，而在基岩表面有溶沟、裂隙、落水洞等发育。这样，基岩透水性很强。当地下水在岩溶的基岩表面附近活动时，水位的升降可使软土层软化，地下水的流动能在上层中产生潜蚀和冲刷可将软上层的上粒带走，于是在基岩表面处被冲刷成洞穴，这就是土洞形成过程。当土洞不断地被潜蚀和冲刷，土洞逐渐扩大，致顶板不能负担上部压力时，地表就发生下沉或整块塌落，使地表呈碟形的，盆形的，深槽的和竖井状的洼地。参见图 8-1。

本类土洞发育的快慢主要取决于基岩面上复土层性质：如为软土或高含水量的稀泥则基岩面上容易被水流潜蚀和冲刷，如果基岩面上土层为不透水的和很坚实的粘土层，则土洞发育缓慢。

地下水的活动强度：水位变化大，容易产生土洞。地下水位以下土洞的发育速度较快，土洞形状多呈上面小，下面大的形状。而当地下水位在上层以下时，上洞的发育主要由于渗入水的作用，发育较缓，土洞多呈竖井状（参见图 8-1）。

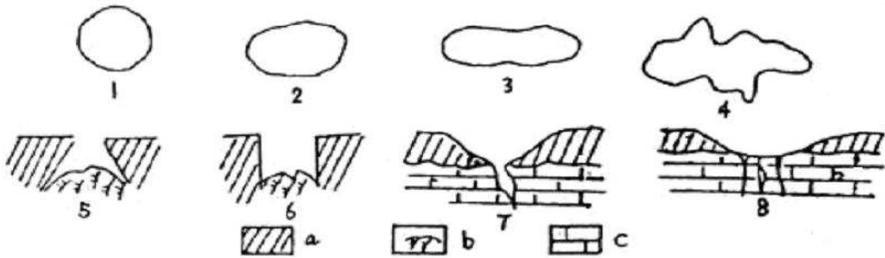


图8-1不同形状土洞形状

1. 圆形，2. 椭圆形，3. 长条形，4. 不规则形，5. 坛状，6. 井状，
7. 漏斗状，8. 碟状，a. 粘土，b. 塌陷堆积物，c. 灰岩

基岩面附近岩溶和裂隙发育程度：当基岩面与土层接触面附近，如裂隙和溶洞溶沟溶槽等岩溶现象发育较好时，则地下水活动加强，造成潜蚀的有利条件。故在这些地下水活动强的基岩面上，土洞一般发育都较快。

四、岩溶地基的类型与评价

（一）岩溶地基的类型

由于岩溶发育，往往使可溶岩表面石芽、溶沟丛生，参差不齐；地下溶洞又破坏了岩体完整性。岩溶水动力条件变化，又会使其上部覆盖土层产生开裂、沉陷。这些都不同程度地影响着建筑物地基的稳定。

根据碳酸盐岩出露条件及其对地基稳定性的影响，可将岩溶地基划分为裸露型、覆盖型、掩埋型三种，而最为重要的是前两种。

1. 裸露型

缺少植被和土层覆盖，碳酸盐岩裸露于地表或其上仅有很薄覆土。它又可分为石芽地基和溶洞地基两种。

(1)石芽地基：由大气降水和地表水沿裸露的碳酸盐岩节理、裂隙溶蚀扩展而形成。溶沟间残存的石芽高度一般不超过 3m。如被土覆盖，称为埋藏石芽。石芽多数分布在山岭斜坡上、河流谷坡以及岩溶洼地的边坡上。芽面极陡，芽间的溶沟、溶槽有的可深达 10 余米，而且往往与下部溶洞和溶蚀裂隙相连。基岩面起伏极大。因此，会造成地基滑动及不均匀沉陷和施工上的困难。

(2)溶洞地基：浅层溶洞顶板的稳定性问题是该类地基安全的关键。溶洞顶板的稳定性与岩石性质、结构面的分布及其组合关系、顶板厚度、溶洞形态和大小、洞内充填情况和水文地质条件等有关。

2. 覆盖型

碳酸盐岩之上覆盖层厚数米至数十米(一般小于 30m)。这类土体可以是各种成因类型的松软土，如风成黄土、冲、洪积砂卵石类土以及我国南方岩溶地区普遍发育的残坡积红粘土。覆盖型岩溶地基存在的主要岩土工程问题是地面塌陷，对这类地基稳定性的评价需要同时考虑上部建筑荷载与土洞的共同作用。

（二）岩溶岩土工程评价

岩溶地基稳定性定性评价属于经验比拟法，适用于初勘阶段选择建筑场地及一般工程的地基稳定性评价。这种方法虽简便，但往往有一定的随意性。实际运用中应根据影响稳定性评价的各项因素进行充分地综合分析，并在勘察和工程实践中不断总结经验。或根据当地相同条件的已有成功与失败工程实例进行比拟评价。

地基稳定性定性评价的核心，是查明岩溶发育和分布规律，对地基稳定有影响的个体岩溶形态特征，如溶洞大小、形状、顶板厚度、岩性、洞内充填和地下水活动情况等，上覆土层岩性、厚度及土洞发育情况，根据建筑物荷载特点，并结合已有经验，最终对地基稳定做出全面评价。根据岩溶地区已有的工程实践，下列若干成熟经验可供参考：

1.当溶沟、溶槽、石芽、漏斗、洼地等密布发育，致使基岩面参差起伏，其上又有松软土层覆盖时，土层厚度不一，常可引起地基不均匀沉陷。

2.当基础砌置于基岩上，其附近因岩溶发育可能存在临空面时，地基可能产生沿倾向临空面的软弱结构面的滑动破坏。

3.在地基主要受压层范围内，存在溶洞或暗河且平面尺寸大于基础尺寸，溶洞顶板基岩厚度小于最大洞跨，顶板岩石破碎，且洞内无充填物或有水流时，在附加荷载或振动荷载作用下，易产生坍塌，导致地基突然下沉。

4.当基础底板之下土层厚度大于地基压缩层厚度，并且土层中有不致形成土洞的条件时，若地下水动力条件变化不大，水力梯度小，可以不考虑基岩内洞穴对地基稳定的影响。

5.基础底板之下土层厚度虽小于地基压缩层计算深度，但土洞或溶洞内有充填物且较密实，又无地下水冲刷溶蚀的可能性；或基础尺寸大于溶洞的平面尺寸，其洞顶基岩又有足够承载能力；或溶洞顶板厚度大于溶洞的最大跨度，且顶板岩石坚硬完整。皆可以不考虑土洞或溶洞对地基稳定的影响。

6.对于非重大或工程重要性等级属于二、三类的建筑物，属下列条件之一时，可不考虑岩溶对地基稳定性的影响：

(1)基础置于微风化硬质岩石上，延伸虽长但宽度小于 1m 的竖向溶蚀裂隙和落水洞的近旁地段；

(2)溶洞已被充填密实，又无被水冲蚀的可能性；

(3)洞体较小，基础尺寸大于洞的平面尺寸；

(4)微风化硬质岩石中，洞体顶板厚度接近或大于洞跨。

岩溶地基稳定性的定性评价中，对裸露或浅埋的岩溶洞隙稳定评价至关重要。根据经验，可按洞穴的各项边界条件，对比表 8—1 所列影响其稳定的诸因素综合分析，做出评价。

鉴于以下两个原因，目前岩溶地基稳定性的定量评价较难实现：一是受各种因素的制约，岩溶地基的边界条件相当复杂，受到探测技术的局限，岩溶洞穴和土洞往往很难查清；二是洞穴的受力状况和围岩应力场的演变十分复杂，要确定其变形破坏形式和取得符合实际的力学参数又很困难。因此，在工程实践中，大多采用半定量评价方法。因目前尚属探索阶段，有待积累资料不断提高。

表 8—1 岩溶洞穴稳定性的定性评价

因素	对稳定有利	对稳定不利
岩性及层厚	厚层块状、强度高的灰岩	泥灰岩、白去质灰岩，薄层状有互层，岩体软化，强度低
裂隙状况	无断裂，裂隙不发育或胶结好	有断层通过，裂隙发育，岩体被二组以上裂隙切割。裂缝张开，岩体呈干砌状
岩层产状	岩层走向与洞轴正交或斜交，倾角平缓	走向与洞轴平行，陡倾角
洞隙形态与埋藏条件	洞体小(与基础尺寸相比)呈竖向延伸的井状，单体分布，埋藏深，覆土厚	洞径大，呈扁平状，复体相连，埋藏浅，在基底附近
顶板情况	顶板岩层厚度与洞径比值大，顶板呈板状或拱状，可见钙质沉积	板岩层厚度与洞径比值小，有悬挂岩体，被裂隙切割且未胶结
充填情况	为密实沉积物填满且无被水冲蚀的可能	未充填或半充填，水流冲蚀着充填物，洞底见有近期塌落物
地下水	无	有水流或间歇性水流，流速大，有承压性

五、岩溶场地岩土工程勘察要点

当拟建工程场地或其附近存在对工程安全有影响的岩溶时，应进行岩溶勘察。

岩溶场地勘察的目的在于查明对场地安全和地基稳定有影响的岩溶化发育规律，各种岩溶形态的规模、密度及其空间分布规律，可溶岩顶部浅层土体的厚度、空间分布及其工程性质、岩溶水的循环交替规律等，并对建筑场地的适宜性和地基的稳定性做出确切的评价。

岩溶勘察宜采用工程地质测绘和调查、物探、钻探等多种手段结合的方法进行，并应符合下列要求：

1.可行性研究勘察应查明岩溶洞隙、土洞的发育条件，并对其危害程度和发展趋势做出判断，对场地的稳定性和工程建设的适宜性做出初步评价；

2.初步勘察应查明岩溶洞隙及其伴生土洞、塌陷的分布、发育程度和发育规律，并按场地的稳定性和适宜性进行分区。

3.详细勘察应查明拟建工程范围及有影响地段的各种岩溶洞隙和土洞的位置、规模、埋深、岩溶堆填物性状和地下水特征，对地基基础的设计和岩溶的治理提出建议。

4.施工勘察应针对某一地段或尚待查明的专门问题进行补充勘察。当采用大直径嵌岩桩时，尚应进行专门的桩基勘察。

根据已有勘察经验，在岩溶场地勘察过程中，应查明与场地选择和地基稳定评价有关的基本问题是：

1.各类岩溶的位置、高程、尺寸、形状、延伸方向、顶板与底部状况、围岩(土)及洞内堆填物性状、塌落的形成时间与因素等。

2.岩溶发育与地层的岩性、结构、厚度及不同岩性组合的关系，结合各层位上岩溶形态与分布数量的调查统计，划分出不同的岩溶岩组。

3.岩溶形态分布、发育强度与所处的地质构造部位、褶皱形式、地层产状、断裂等结构面及其属性的关系。

4.岩溶发育与当地地貌发展史、所处的地貌部位、水文网及相对高程的关系。划分出岩溶微地貌类型及水平与垂向分带。阐明不同地貌单位上岩溶发育特征及强度差异性。

5.岩溶水出水点的类型、位置、标高、所在的岩溶岩组、季节动态、连通条件及其与地面水体的关系。阐明岩溶水环境、动力条件、消水与涌水状况、水质与污染。

6.土洞及各类地面变形的成因、形态规律、分布密度与土层厚度、下伏基岩岩溶特征、地表水和地下水动态及人为因素的关系。结合已有资料，划分出土洞与地面变形的类型及发育程度区段。

7.在场地及其附近有已(拟)建人工降水工程，应着重了解降水的各项水文地质参数及空间与时间的动态。据此预测地表塌陷的位置与水位降深、地下水流向以及塌陷区在降落漏斗中的位置及其间的关系。

8.土洞史的调查访问、已有建筑使用情况、设计施工经验、地基处理的技术经济指标与效果等。勘察阶段应与设计相应的阶段一致。各勘察阶段的要求和方法如表 8-2 所列。

为了评价洞穴稳定性时,可采取洞体顶板岩样及充填物土样作物理力学性能试验。必要时可进行现场顶板岩体的载荷试验。当需查明土的性状与土洞形成的关系时,可进行覆盖层土样的物理力学性质试验。

为了查明地下水动力条件和潜蚀作用、地表水与地下水的联系、预测土洞及地面塌陷的发生和发展时,可进行水位、流速、流向及水质的长期观测。

岩溶勘察报告除应符合岩土工程勘察报告的一般规定之外,尚应包括下列内容:

- 1.岩溶发育的地质背景和形成条件;
- 2.洞隙、土洞、塌陷的形态、平面位置和顶底标高;
- 3.岩溶稳定性分析;
- 4.岩溶治理和监测的建议。

六、岩溶场地的防治处理措施

(一) 建筑布局措施与结构措施

场地上主要建筑物的位置应尽量避免避开岩溶发育强烈的地段、尽可能选择在非(弱)可溶岩分布地段;在总平面布局上,各类安全等级建筑物的布置应与岩溶发育程度或场地稳定程度相适应。基础结构型式应有利于与上部结构协同工作,要求其具有适应小范围塌落变位能力并以整体结构为主,如配筋的十字交叉条基、筏板、箱基等。当基础下存在深度大溶洞裂隙时,应当根据上部建筑荷载及洞隙跨度,选择洞隙两侧可靠岩体,采用有足够支撑的梁、板、拱或悬挑等跨越结构。

必须注意,随着人类工程建设的广泛性,对建筑场地的无法选择性将会越来越多,因此,结构方面的措施将会越来越多地被采取。

(二) 岩溶塌陷工程治理程序与治理方法

1.岩溶塌陷工程治理程序是首先勘查确定其危险性、危害性及防治的必要性和可行性;其次是针对岩溶塌陷的发育条件和成因,根据防治工程的目的做好防治工程设计;再按设计文件精心施工。

2.岩溶塌陷应采取预防和治理相结合的防治措施。预防措施是在查明塌陷成因、影响因素和致塌效应的基础上,为了清除或消减塌陷发生发展主导因素的作用而采取的工程措施。如设置场地完善的排水系统,进行地表河流的疏导或改道,填补河床漏水点或落水洞,调整抽水井孔布局和井距,控制抽水井的降深和抽水量,限制开采井的抽水井段,重要建筑物基底下隐伏洞隙的预注浆封闭处理等。

对塌陷地基都需要进行处理,未经处理不能作为天然地基。其处理措施有清除填堵法、跨越法、强夯法、灌注法、深基础法、旋喷加固法、地表水的(疏、排、围、改)治理、平衡地下水(气)压力法等。

对地基稳定性有影响的岩溶洞隙,应根据其位置、大小、埋深、围岩稳定性和水文地质条件综合分析,因地制宜采取下列处理措施:

- 1.对洞口较小的洞隙,宜采用镶补、嵌塞与跨盖等方法处理;
- 2.对洞口较大的洞隙,宜采用梁、板和拱等结构跨越。跨越结构应有可靠的支承面。梁式结构在岩石上的支承长度应大于梁高的1.5倍,也可采用浆砌块石等堵塞措施;
- 3.对于围岩不稳定、风化裂隙破碎的岩体,可采用灌浆加固和爆破填塞等措施;

4.对规模较大的洞隙,可采用洞底支撑或调整柱距等方法处理。由地表水形成的土洞或塌陷地段,应采取地表截流、防渗或堵漏等措施。应根据土洞埋深,分别选用挖填、灌砂等方法进行处理。

由地下水形成的塌陷及浅埋土洞,应清除软土,抛填块石作反滤层,面层用粘土夯填;深埋土洞宜用砂、砾石或细石混凝土灌填。在上述处理的同时,尚应采用梁、板或拱跨越。对重要的建筑物,可采用桩基处理。

表 8-2 各阶段岩溶地区建筑岩土工程勘察要求和方法表

勘察阶段	勘察要求	勘察方法和工作量
可行性研究	应查明岩溶洞隙、土洞的发育条件,并对其危害程度和发展趋势做出判断,对场地的稳定性和建筑适宜性做出初步评价。	宜采用工程地质测绘及综合物探方法。发现有异常地段时,应选择有代表性部位布置钻孔进行验证核实,并在初划的岩溶分区及规模较大的地下洞隙地段适当增加勘探孔。控制孔应穿过表层岩溶发育带,但深度不宜超过 30m。
初步勘察	应查明岩溶洞隙及其伴生土洞、地表塌陷的分布、发育程度和发育规律,并按场地的稳定性和建筑适宜性进行分区。	
详细勘察	<p>应查明建筑物范围或对建筑有影响地段的各种岩溶洞隙及土洞的状态、位置、规模、埋深、围岩和岩溶堆填物性状,地下水埋藏特征;评价地基的稳定性。在岩溶发育区的下列部位应查明土洞和土洞群的位置:</p> <p>(1)土层较薄、土中裂隙及其下岩体岩溶发育部位。</p> <p>(2)岩面张开裂隙发育,石芽或外露的岩体交接部位。</p> <p>(3)两组构造裂隙交汇或宽大裂隙带。</p> <p>(4)隐伏溶沟、溶槽、漏斗等,其上有软弱土层分布覆盖地段。</p> <p>(5)降水漏斗中心部位。当岩溶导水性相当均匀时,宜选择漏斗中地下水流向的上游部位;当岩溶水呈集中渗流时,宜选择地下水流向的下游部位。</p> <p>(6)地势低洼和地面水体近旁。</p>	<p>宜按建筑物轴线布置物探线,并宜采用多种方法判定异常地段及其性质。对基础下和邻近地段的物探异常点或基础点顶面荷载大于 2000kN 的独立基础,均匀布置验证性钻孔。当发现有危及工程安全的洞体时,应采取加密钻孔或物探等措施。必要时可采取顶板及洞内堆填物的岩土试样,其勘探应符合下列规定:</p> <p>(1)当基底土层厚度不足时,应将勘探孔全部或部分钻入基岩。当在预定深度内遇见洞体时,应将部分勘探孔钻入洞底以下;当遇有中等风化基岩时,其深度不应小于洞底以下 2m。</p> <p>(2)当需查明浅埋岩溶的岩组分界、断裂及岩溶土洞的形态或验证其他勘探手段的成果时,应采取岩土试样或进行原位测试,并应布置适量的探槽或探井。</p> <p>(3)在土洞发育地段,应沿基础轴线或在每个单独基础位置上以较大密度布置静力触探或小口径钎探,查明土洞、地表塌陷的分布。</p>
施工勘察	应针对某一地段或尚待查明的专门事项进行补充勘察和评价。当基础采用大直径嵌岩桩或墩基时,尚应进行专门的桩基勘察。	应根据岩溶地基处理设计和施工要求布置。在土洞、地表塌陷地段,可在已开挖的基槽内布置触探和钎探。对大直径嵌岩桩或墩基,勘探点应按桩或墩布置,勘探深度应为其底面以下桩径的 3 倍并不小于 5m,当相邻桩底的基岩面起伏较大时应适当加深。对重要或荷载较大的工程,应在墩底加设小口径钻孔,并应进行检测工作。

第二节 斜坡的变形与破坏

一、概述

斜坡系指地壳表层一切具有侧向临空面的地质体,是地壳表层广泛分布的一种地貌形式。它一般分为天然斜坡(沟谷、岸坡、山坡、海岸等)和人工边坡(渠道边坡、基坑边坡、路堑边坡、露天矿边坡等)。斜坡内应力的变化导致斜坡变形和破坏。

斜坡是人类工程和生活活动最普遍的地质环境,它的经常活动会造成人类生存地质环境的恶化,甚至会给人类带来灾害性的损失,在相关的地质灾害中其破坏程度仅次于地震。

斜坡变形破坏类型

(一) 斜坡变形

斜坡变形按其机制可分为以下三种形式:

1. 拉裂

在坚硬岩土体组成的高陡斜坡坡肩部位最常见。其空间分布特点是:上宽下窄,以致尖灭,有坡面向坡里逐渐减少。

2. 蠕滑

斜坡岩土体沿局部滑移面向临空方向的缓慢剪切变形。

3. 弯折倾倒

由陡倾板(片)状岩石组成的斜坡,当走向于坡面平行时,在重力作用下所发生的向临空面方向同步弯曲的现象。

(二) 斜坡破坏

斜坡破坏的形式主要为崩塌和滑坡。

1. 崩塌

崩塌(崩落、垮塌或塌方)是较陡斜坡上的岩土体在重力作用下突然脱离母体崩落、滚动、堆积在坡脚(或沟谷)的地质现象。产生在土体中者称土崩,产生在岩体中者称岩崩。规模巨大、涉及到山体者称山崩。大小不等、零乱无序的岩块(土块)呈锥状堆积在坡脚的堆积物,称崩积物,也可称为岩堆或倒石堆。

2. 滑坡

滑坡是指斜坡上的土体或岩体,受河流冲刷、地下水活动、地震及人工切坡等因素的影响,在重力的作用下,沿着一定的软弱面或软弱带,整体地或分散地顺坡向下滑动的自然现象。滑坡的别名叫做地滑,我国许多地方山区的群众,形象地把滑坡称为“走山”。

二、崩塌形成条件及特征

崩塌是斜坡破坏的一种型式,它对房屋、道路等建筑物常带来威胁。酿成人身安全事故。尤其对交通线路的危害最严重,我国宝成、成昆、襄渝铁路和川藏公路沿线崩塌灾害常影响线路正常运营。因此,对崩塌的形成和运动学特征需很好地进行研究。

1. 一般发生在厚层坚硬脆性岩体中。这类岩体能形成高陡的斜坡。斜坡前缘由于应力重分布和卸荷等原因,产生长而深的拉张裂缝,并与其他结构面组合,逐渐形成连续贯通的分离面。在触发因素作用下发生崩塌。组成这类岩体的岩石有砂岩、灰岩、石英岩、花岗岩等。此外。近于水平状产出的软硬相间岩层组成的陡坡,由于软弱岩层风化剥蚀,也会形成局部崩塌。

2.构造节理和成岩节理对崩塌的形成影响很大。硬脆性岩体中往往发育有二组或二组以上的陡倾节理,其中与坡面平行的一组节理常演化为拉张裂缝。当节理密度较小,但延展性、穿切性较好时,常能形成较大体积的崩塌体。此外,大规模的崩塌(山崩)经常发生在新构造运动强烈、地震频发的高山区。

3.崩塌的形成又与地形直接相关。崩塌一般发生在高陡斜坡的前缘。发生崩塌的地面坡度往往大于45°,尤其是大于60°的陡坡。地形切割愈强烈、高差愈大,形成崩塌的可能性愈大,并且破坏也愈严重。

4.风化作用也对崩塌形成有一定影响。因为风化作用能使斜坡前缘各种成因的裂隙加深加宽,对崩塌的发生起催化作用。此外,在干旱、半干旱气候区,由于物理风化强烈,导致岩石机械破碎而发生崩塌。高寒山区的冰劈作用也有利于崩塌的形成。

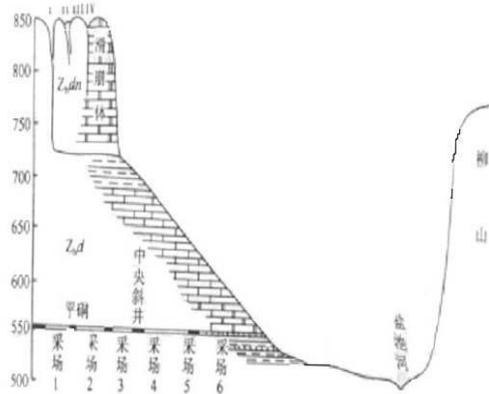
在上述诸条件制约下,崩塌的发生还与短时的裂隙水压力以及地震或爆破震动等触发因素有密切关系。尤其是强烈的地震,常可引起大规模崩塌,造成严重灾祸。

图 8-2 盐池河崩塌山体地质剖面图

湖北省远安县境内的盐池河磷矿灾难性山崩,是崩塌形成诸条件制约的典型实例。该磷矿位于一个峡谷中。岩层为上震县统灯影组(Z_0d_n)厚层块状白云岩及上震旦统陡山沱组(Z_0d)含磷矿层的薄至中厚层白云岩、白云质泥岩及砂质页岩。岩层中发育有两组垂直节理,使山顶部的灯影组厚层白云岩三面临空。地下采矿平巷使地表沿两组垂直节理追踪发展张裂缝。1980年6月8日~10日连续两天大雨的触发,使山体顶部前缘厚层白云岩沿层面滑出形成崩塌,体积约100万立方米,造成生命财产的严重损失。

三、滑坡要素

一个滑坡从孕育到形成,一般都有一个从量变到质变的过程,即经历从孕育、蠕变、剪切、形成四个阶段。这个过程因滑坡形成环境和影响因素的不同而有长有短。通常斜坡上的地质体进入蠕变阶段即可视为滑坡。而当滑坡已经发展到了一定的阶段并出现明显的标志时(如滑面已经贯通、滑体发生了明显位移),都具有一些可以测量的特征,这些特征就是滑坡要素。当



1—灰黑色粉砂质页岩; 2—磷矿层; 3—厚层块状白云岩; 4—薄至中厚层白云岩; 5—裂缝编号;
6—白云质泥岩及砂质页岩; 7—薄至中厚层板状白云岩; 8—震旦系上统灯影组; 9—震旦系上统陡山沱组

图8—2盐池河崩塌山体地质剖面图

然具体到每一个滑坡并非所有要素都是齐全的。了解滑坡要素是认识、分析滑坡的基础，也是不同滑坡间相互对比的前提。

滑坡体（滑体）：就是发生滑动的岩土体。滑体两侧、前后缘和滑动面附近的物质，在滑动时不可避免地会发生崩塌、揉皱和土石翻滚等扰动现象，但主体一般仍能保持相对完整状态，特别是在滑移距离不远、地形坡度较缓的情况下。此外，在滑动过程中，由于大量裂缝的出现和岩土体孔隙的增加，常会使滑体体积“增大”，增大的比例与岩性、滑面形态和滑移速率有关，一般情况下是滑动前体积的 1.1~1.3 倍。

滑动面：指滑坡体沿不动体下滑的分界面。常循地质软弱面发育而成，如地层中的软弱夹层、断层面、裂隙面、岩（土）分界面等。有些滑坡具有多级滑面，在剖面上形成向下收敛的滑面组，最下面的一条称主滑面，其它称次滑面。滑动面上部受滑动揉皱而形成一定厚度的扰动带称为滑动带，其厚度毫米至数米不等。滑面剖面形态可以是直线状、曲线状、折线状或其它不规则状。滑坡发生后，滑面多数情况下上部裸露、下部被滑体掩盖，偶尔也可见到全部滑面都裸露出来的实例。

滑坡床（滑床）：滑坡体下面没有滑动的岩土体（其表面就是滑动面）。

滑坡周界：滑动面在平面上的展布范围，也就是滑坡体与周围不动体在平面上的分界线。

滑坡壁：滑体移动后，因后缘拉开而暴露在外面的拉裂面。一般平面上呈弧形，倾角多大于 50°，滑坡壁上有时可见垂向擦痕。滑坡壁向下延伸倾角变缓并与滑动面相连。

滑坡台阶：由于滑体上、下各部分滑动速度的差异，或滑动时间先后不同，在滑体表面形成的略向后倾的阶状错台。错台上如果生长有树木，常因滑体旋转而倾斜、弯曲，形成所谓的“醉汉林”或“马刀树”。

封闭洼地：滑坡体与滑坡壁间拉开后形成四周高、中间低的沟槽。沟槽中积水时称滑坡积水洼地。当滑体上、下部之间发生较大差异滑动时，封闭洼地和滑坡积水洼地也可在滑坡体的中部出现。

滑坡舌：滑坡体前缘呈舌状的部分。

滑坡鼓丘：滑坡体前缘因滑动受阻而隆起的小丘。

拉张裂缝：滑坡体上部的弧形开放性裂缝，与滑坡壁的走向大致平行。通常将其最外一条称滑坡主裂缝或破裂缘。在主裂缝上部的斜坡中，由于滑体移动造成的卸荷作用，常形成一系列拉张裂缝，这些裂缝形态、产状与主裂缝相近，但无明显垂向位移，称之为卸荷~引张裂缝，滑坡范围可能沿着这些裂缝进一步扩大。

剪切裂缝：位于滑坡体中部两侧，系坡体下滑时与两侧不动体相对剪切作用所致，常呈羽毛状或雁行排列。在滑体纵向滑移速度差异明显时，滑体内部也可形成与滑动方向相近的以水平错动为主的剪切裂缝。

扇形裂缝：位于滑坡体下部，平面呈扇骨状，系滑坡前部挤压或侧向扩张所形成。

鼓张裂缝：位于滑坡体下部，平面上往往呈断续弧形，并与扇形裂缝大致垂直，系滑坡体前部挤压拱起所形成。

滑坡泉：滑坡发生后，改变了原有斜坡的水文地质结构，在滑体内或滑体周缘形成新的地下水集中排泄点，称为滑坡泉。

剪出口：滑动面与斜坡下部原始地面的交线，一般情况下被滑体覆盖。

滑坡坝和滑坡湖：滑体进入河（沟）道，阻断河水的滑坡堆积体称为滑坡坝，坝上游壅水成湖称为滑坡湖。

滑坡轴（主滑线）：滑坡体滑动速度最快的纵向线。代表整个滑坡的滑动方向，一般位于推力最大，滑面埋深最大（滑体最厚）的纵断面上。在平面上为直线或曲线。

主滑方向：滑坡轴指向坡下的方向。

滑动距离：分为总滑距、水平滑距和垂直滑距。总滑距是指滑体中的某一点在位移前后位置变化的最大距离；水平滑距是指总滑距在水平面上的垂直投影；垂直滑距是指总滑距在垂直于主滑方向的平面上的水平投影。

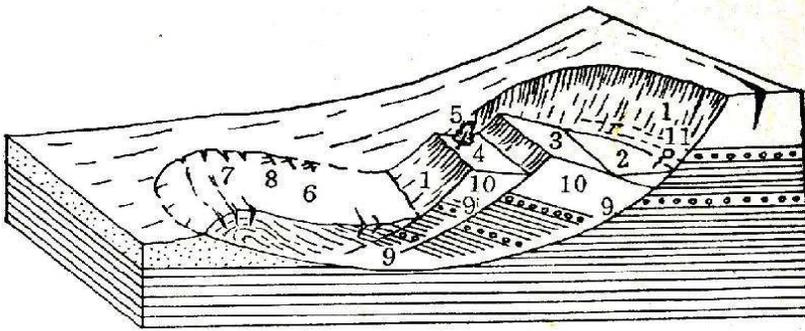


图8-3滑坡的外貌及滑坡要素

1滑坡壁；2滑坡洼地；3滑坡台阶；4滑坡台阶；5醉树；6滑坡舌；
7鼓张裂缝；8羽状裂缝9滑动面；10滑坡体；11滑坡泉。

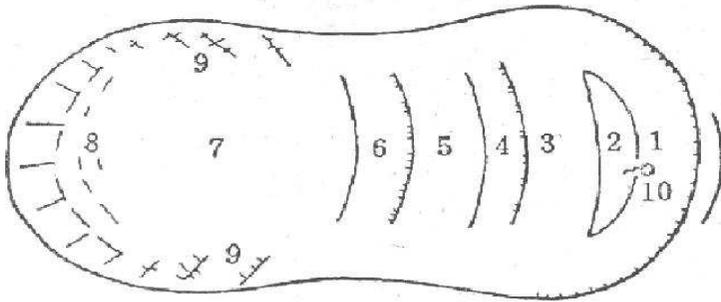


图8-4滑坡俯视平面示意

1滑坡壁；2滑坡洼地；3~6滑坡台阶；7滑坡体；
8扇形鼓张裂缝；9羽状裂缝；10滑坡泉。

四、滑坡的发育阶段

一般说来，滑坡的发生是一个长期的变化过程，通常将滑坡的发育过程划分为四个阶段：

（一）蠕动变形阶段

斜坡在发生滑动之前通常是稳定的。在斜坡形成过程中，由于斜坡侧向临空面的产生，斜坡附近的岩土体发生卸荷回弹，引起斜坡应力重分布和应力分异、应力集中等效应。有时在自然条件和人为因素作用下，可以使斜坡

岩土强度逐渐降低（或斜坡内部剪切力不断增加），造成斜坡内部的应力状态发生改变，表现为愈接近坡面，最大主应力愈与之平行，而最小主应力与之近乎直交；向坡体内逐渐恢复初始状态。由于应力分异的结果，在坡面附近产生应力集中带。在坡脚附近形成最大剪应力增高带；坡肩附近形成拉应力破坏带。土坡的稳定状况受到破坏。

（二）剪切变形阶段

在斜坡内部某一部分因抗剪强度小于剪切力而首先变形，产生微小的移动，往后变形进一步发展，直至坡面出现断续的拉张裂缝。随着拉张裂缝的出现，渗水作用加强，变形进一步发展，后缘拉张，裂缝加宽，开始出现不大的错距，两侧剪切裂缝也相继出现。坡脚附近的岩土被挤压、滑坡出口附近潮湿渗水，此时滑动面已大部分形成，但尚未全部贯通。斜坡变形再进一步继续发展，后缘拉张裂缝不断加宽，错距不断增大，两侧羽毛状剪切裂缝贯通并撕开，斜坡前缘的岩土挤紧并鼓出，出现较多的鼓张裂缝，滑坡出口附近渗水混浊，这时滑动面已全部形成，接着便开始整体地向下滑动。

从斜坡的稳定状况受到破坏，坡面出现裂缝，到斜坡开始整体滑动之前的这段时间称为滑坡的蠕动变形阶段。蠕动变形阶段所经历的时间有长有短。长的可达数年之久，短的仅数月或几天的时间。一般说来，滑动的规模愈大，蠕动变形阶段持续的时间愈长。斜坡在整体滑动之前出现的各种现象，叫做滑坡的前兆现象，尽早发现和观测滑坡的各种前兆现象，对于滑坡的预测和预防都是很重要的。

（三）滑动破坏阶段

滑坡在整体往下滑动的时候，滑坡后缘迅速下陷，滑坡壁越露越高，滑坡体分裂成数块，并在地面上形成阶梯状地形，滑坡体上的树木东倒西歪地倾斜，形成“醉林”，滑坡体上的建筑物（如房屋、水管、渠道等）严重变形以致倒塌毁坏。

随着滑坡体向前滑动，滑坡体向前伸出，形成滑坡舌。一般为几秒钟到十几分钟，滑动过程即告结束。在滑坡滑动的过程中，滑动面附近湿度增大，并且由于重复剪切，岩土的结构受到进一步破坏，从而引起岩土抗剪强度进一步降低，促使滑坡加速滑动。滑坡滑动的速度大小取决于滑动过程中岩土抗剪强度降低的绝对数值，并和滑动面的形状，滑坡体厚度和长度，以及滑坡在斜坡上的位置有关。

如果岩土抗剪强度降低的数值不多，滑坡只表现为缓慢的滑动，如果在滑动过程中，滑动带岩土抗剪强度降低的绝对数值较大，滑坡的滑动就表现为速度快、来势猛，滑动时往往伴有巨响并产生很大的气浪，有时造成巨大灾害。

（四）渐趋稳定阶段

由于滑坡体在滑动过程中具有动能，所以滑坡体能越过平衡位置，滑到更远的地方，滑动停止后，除形成特殊的滑坡地形外，在岩性、构造和水文地质条件等方面都相继发生了一些变化。

例如：地层的整体性已被破坏，岩石变得松散破碎，透水性增强含水量增高，经过滑动，岩石的倾角或者变缓或者变陡，断层，节理的方位也发生了有规律的变化；地层的层序也受到破坏，局部的老地层会覆盖在第四纪地层之上等等。

在自重的作用下，滑坡体上松散的岩土逐渐压密，地表的各种裂缝逐渐被充填，滑动带附近岩土的强度由于压密固结又重新增加，这时对整个滑坡的稳定性也大为提高。经过若干时期后，滑坡体上的东倒西歪的“醉林”又重新垂直向上生长，但其下部已不能伸直，因而树干呈弯曲状，有时称它谓“马刀树”，这是滑坡趋于稳定的一种现象。当滑坡体上的台地已变平缓，滑坡后壁变缓并生长草木，没有崩塌发生；滑坡体中岩土压密，地表没有明显裂缝，滑坡前缘无水渗出或流出清晰的泉水时，就表示滑坡已基本趋于稳定。

滑坡趋于稳定之后，如果滑坡产生的主要因素已经消除，滑坡将不再滑动，而转入长期稳定。若产生滑坡的主要因素并未完全消除，且又不断积累，当积累到一定程度之后，稳定的滑坡便又会重新滑动。

五、滑坡的分类

滑坡有多种分类：通常按照岩土体性质分为土层和岩石两种；滑坡按地貌特征和发育过程可分为堆积层滑坡和基岩滑坡。根据物质可分为黄土、粘土、碎屑和基岩滑坡等（表 8-3）；根据岩性和构造可分为顺层面、构造面和不整合面滑坡等；按滑动面特征可分为均匀滑坡（滑动面近似圆弧面）、顺层滑坡（滑动面呈平坦阶梯状）、切层滑坡（其滑动面切割了不同的岩层层面，形成滑坡平台）；根据触发原因可分为人工切滑、冲刷、超载、饱水、潜蚀和地震滑坡等；按年代可分为新、老、古滑坡；根据滑动力学特征可分为牵引式（坡脚挖方或河流冲刷坡脚引起）、推移式（斜坡上方不恰当的加荷引起的）、平推式与混合式几种；按照滑体厚度可分为浅层（小于 10 米）、中层（10~30 米）、深层（大于 30 米）三类；按照滑体体积又可分为小型（小于 30 万 m³）、中型（30~100 万 m³）、大型（100~1000 万 m³）及巨型（大于 1000 万 m³）四类。

表 8-3 按滑坡体组成物分类

滑坡类型	易滑坡的岩性	滑坡特征
粘性土	裂隙粘土：干湿效应明显 残积粘土：胀缩性强	成群出现，滑床平缓
黄土	新老黄土界面 老黄土中有土塌层或钙质层 不同成因黄土界面 黄土与基岩界面	成群出现，变形急剧、滑速快、规模大，动能大，具有场性，黄土中滑面呈剪裂破碎状，粘土砂砾中滑面光滑，受水作用显著，地下水量大，有明显含水层
堆积土	砾石土(洪被积) 碎石土(坡、残积) 碎块石土(崩塌积)	多沿基岩面，规模较大，滑速慢，地下水较多
破碎岩石	断裂破碎 风化破碎 古滑坡错落体	沿构造面和层面产生，地下水丰富，无明显含水层，断层带中常成群出现，规模较大
岩石	半成岩的沉积岩 软岩或软硬相间 千枚岩、板岩、片岩 尚完整的各种岩石，裂隙切割	沿结构面，滑速与层面倾角有关、滑带常在软层内

六、滑坡的影响因素

凡是引起斜坡岩土体失稳的因素称为滑坡的影响因素。主要的滑坡影响因素有：

1.斜坡外形

斜坡的存在，使滑动面能在斜坡前缘临空出露。这是滑坡产生的先决条件。同时，斜坡不同高度、坡度、形状等要素可使斜坡内力状态变化，内应力的变化可导致斜坡稳定或失稳。当斜坡愈陡、高度愈大以及当斜坡中上部突起而下部凹进，且坡脚无抗滑地形时，滑坡容易发生。

2.岩性

滑坡主要发生在易亲水软化的上层中和一些软岩中。例如粘质土、黄土和黄土类土、山坡堆积、风化岩以及遇水易膨胀和软化的土层。软岩有页岩、泥岩和泥灰岩、干枚岩以及风化凝灰岩等。

3.构造

斜坡内的一些层面、节理、断层、片理等软弱面若与斜坡坡面倾向近于一致，则此斜坡的岩土体容易失稳成为滑坡。这时，此等软弱面组合成为滑动面。

4.水

水的作用可使岩土软化、强度降低，可使岩土体加速风化。水的作用还可使斜坡滑动面中的岩土体的抗剪强度大大降低，加大了斜坡滑动的可能性。若为地表水作用还可以使坡脚侵蚀冲刷；地下水位上升可使岩土体软化、增大水力坡度等。不少滑坡有“大雨大滑、小雨小滑、无雨不滑”的特点，说明水对滑坡作用的重要性。

5.地震

地震可诱发滑坡发生，此现象在山区非常普遍。地震首先将斜坡岩土体结构破坏，可使粉砂层液化，从而降低岩土体抗剪强度；同时地震波在岩土体内传递，使岩土体承受地震惯性力，增加滑坡体的下滑力，促进滑坡的发生。

6.人为因素

(1)在兴建土建工程时，由于切坡不当，斜坡的支撑被破坏，或者在斜坡上方任意堆填土方、兴建工程、增加荷载，都会破坏原来斜坡的稳定条件。

(2)人为地破坏表层覆盖物，引起地表水下渗作用的增强，或破坏自然排水系统，或排水设备布置不当，泄水断面大小不合理而引起排水不畅，漫溢乱流，致使坡体水量增加。

(3)引水灌溉或排水管道漏水将会使水渗人斜坡内，促使滑动因素增加。

七、稳定性评价方法

斜坡稳定性评价的目的是：合理设计人工边坡，使之既稳定安全，又不浪费开挖工作量；评定、核算与工程有关的天然斜坡稳定性现状及受工程影响后的稳定性状况；对已建成的人工边坡检查其稳定性状况；为整治斜坡提供设计依据。

斜坡稳定性评价方法有多种，常用的有：自然历史分析法、力学计算法、图解法和工程地质类比法。大体上属定性评价和定量评价两大类。

边坡稳定性计算方法，根据边坡类型和可能的破坏形式，按下列原则确定：

1. 土质边坡和规模较大的碎裂结构的岩质边坡宜采用圆弧滑动法计算；
2. 对可能产生平面滑动的边坡宜采用平面滑动法进行计算；
3. 对可能产生折线滑动的边坡宜采用折线滑动法进行计算；

4. 对结构复杂的岩质边坡，可配合采用赤平极射投影法和实体比例投影法分析；

5. 当边坡破坏机制复杂时，宜结合数值分析法进行分析。

(一) 自然历史分析法

这是一种定性评价的方法。主要通过研究斜坡形成的地质历史和所处的自然地理及地质环境、斜坡的地貌和地质结构、发展演化阶段及变形破坏痕迹，来分析主要的和次要的影响因素，从而对斜坡稳定性做出初步评价。所以这种方法实际上是通过追溯斜坡发生、发展演化的全过程，来进行稳定性评价的。它对研究斜坡稳定性的区域性规律尤为适用。

自然历史分析法主要包括三方面研究内容：

1. 区域地质背景的研究，包括区域构造、地层岩性分布和地形地貌特点以及近期地壳运动强烈程度（如地壳运动形式、地应力状态、有否活断层分布及其特征等），并结合斜坡变形破坏的分布和特征，就可以建立起斜坡变形破坏现象与区域地质背景间的相关关系。可由点到面来研究斜坡变形破坏的某些规律。这是一项基础性、且带有全局意义的研究工作。

2. 分析促使斜坡演变的主导因素及触发因素。尤其是一些周期性因素（气候、水文、地震）与斜坡变形破坏间的相关性。

3. 预测斜坡所处的演化阶段和发展趋势，可能的破坏方式。可通过斜坡地质结构、外形及变形破坏痕迹来进行，也可通过必要的监测手段来研究。

需要指出的是：自然历史分析法虽属初步的、定性的评价方法，但是它是其他各种评价方法的基础；没有这种评价方法。其他评价方法将难以进行。

(二) 力学算法

力学算法主要适用于滑坡类破坏型式，是一种定量评价的方法。常用的是刚体极限平衡法。采用这种方法的前提条件是：①只考虑破坏面上的极限平衡状态，而不考虑岩土体的变形，即视岩土体为刚体；②破坏面（滑动面）上的强度由凝聚力和摩擦力（ C 、 ϕ 值）控制，即遵循库仑判据；③滑体中的应力。以正应力与剪应力的方式，集中作用于滑面上，即均为集中力；④以平面（二维）课题来处理，这是为了求解方便而对实际情况的简化。

刚体极限平衡法表面上看来是一种严格的定量评价方法，但是由于上述的前提条件。以及边界条件确定和计算参数的取得都还存在不少问题。因此在实际工作中。常根据斜坡或边坡工程的重要性及具体情况，用一个稳定安全系数 K 。来保证计算的安全度。一般规定 $K=1.1\sim 1.5$ ，即要求计算所得斜坡或工程边坡的稳定系数 K 大于这个数字才是安全稳定的，否则将是不安全的。

根据岩土体的不同及边界条件的的不同，计算公式较多，这里仅介绍《建筑边坡工程技术规范》（GB50330—2002）里应用的几种方法

1. 圆弧滑动法

当滑动面为圆弧或单一平面时，可按下列式计算稳定安全系数：

$$K_s = \frac{\sum_{i=1}^n R_i}{\sum_{i=1}^n T_i} = \frac{\sum_{i=1}^n N_i \tan \phi_i + \sum_{i=1}^n c_i l_i}{\sum_{i=1}^n T_i} = \frac{\sum_{i=1}^n W_i \cos \alpha_i \tan \phi_i + \sum_{i=1}^n c_i l_i}{\sum_{i=1}^n W_i \sin \alpha_i} \quad (8-7)$$

式中： l_i ——第 i 块土条滑动弧的长度， m ；

W_i ——第*i*块土条重量, kN;
 N_i ——第*i*块土条重量的切向分力, kN;
 T_i ——第*i*块土条重量的滑动分力, kN;
 α_i ——第*i*块土条中点圆弧切线与水平面的夹角 (°);
 c_i 、 φ_i ——第*i*块土条土体抗剪强度粘聚力 (kPa) 和内摩擦角 (°);
 n ——土条数。

2. 折线条分法

当滑动面为折线时, 可采用下式计算稳定安全系数:

$$K_s = \frac{\sum_{i=1}^n \left(R_i \prod_j^{n-i} \psi_j \right) + R_n}{\sum_{i=1}^n \left(T_i \prod_j^{n-i} \psi_j \right) + T_n} \quad (8-8)$$

式中: ψ_j ——第*i*块段剩余下滑力传递至第*i+1*块段时传递系数,

$$\psi_j = \cos(\alpha_i - \alpha_{i+1}) - \sin(\alpha_i - \alpha_{i+1}) \tan \varphi_{i+1}$$

$$\prod_j^{n-1} \psi_j = \psi_i \cdot \psi_{i+1} \cdot \psi_{i+2} \cdots \psi_{n-1}$$

R_i ——作用于第*i*块段的抗滑力, kN/m;

$$R_i = N_i \tan \varphi_i + c_i l_i$$

N_i ——第*i*块段的滑动体 W_i 的法向分力, kN/m;

T_i ——作用于第*i*块段的滑动面上的滑动分力, 当 $T_i < 0$ 时取负值, kN/m;

其他参数意义同前。

滑坡推力计算应符合下列规定:

(1) 当滑体有多层滑面时, 应取推力最大的滑动面进行计算, 确定滑坡推力。

(2) 选择平行于滑动方向的几个具有代表性的断面进行计算, 计算断面不少于两个, 其中一个为主滑断面。

(3) 滑坡推力作用点, 可取滑坡厚度的1/2处。

(4) 滑坡推力稳定安全系数应该根据现状及对工程的影响等因素, 对地基基础设计为甲级的建筑物宜取1.25, 设计等级为乙级的建筑物宜取1.15, 设计等级为丙级的建筑物宜取1.05。

(4) 根据岩土的性质和当地的经验, 可采取试验和滑坡反分析相结合的手段, 合理确定滑动面上的抗剪强度指标。

3. 平面滑动法

采用平面滑动法时, 稳定安全系数可按式确定:

$$K_s = \frac{rV \cos \theta g \varphi + Ac}{rV \sin \theta} \quad (8-9)$$

式中: r ——岩土体的重度 (kN/m³)

c ——结构面的粘聚力 (kPa)

φ ——结构面的内摩擦角 (°)

A ——结构面的面积 (m²)

V ——岩体的体积 (m³)

θ ——结构面的倾角 (°)

边坡工程稳定性验算时,各种方法的稳定性应不小于下表规定的稳定安全系数要求,否则应对边坡进行处理。

表 8-4 边坡稳定安全系数

稳定安全系数 边坡工程安全等级	一级边坡	二级边坡	三级边坡
	计算方法		
平面滑动法	1.35	1.30	1.25
折线滑动法			
圆弧滑动法	1.30	1.25	1.20

注:对地质条件很复杂或破坏结果很严重的边坡工程,其稳定安全系数宜适当提高。

边坡工程应按其损坏后可能造成的破坏后果(危及人的生命,造成经济损失,产生社会不良影响)的严重性、边坡类型和坡高等因素根据下表确定安全等级。

表 8-5 边坡工程安全等级

边坡类型		边坡高度 (m)	破坏后果	安全等级
岩质边坡	岩体类型为 I 类和 II 类	$H \leq 30$	很严重	一级
			严重	二级
			不严重	三级
	岩体类型为 III 类和 IV 类	$30 < H \leq 15$	很严重	一级
			严重	二级
			不严重	三级
土质边坡	$10 < H \leq 15$	很严重	一级	
		严重	二级	
		不严重	三级	
	$H \leq 10$	很严重	一级	
		严重	二级	
		不严重	三级	

注:1.一个边坡工程的各段,可根据实际情况采用不同的安全等级;

2.对危害性及严重、环境和地质条件复杂的特殊边坡工程,其安全等级应根据工程情况适当提高。

(三) 图解法

图解法是一种定性或半定量的评价方法。在斜坡稳定性评价中,一般采用两种图解法,即图表计算法和图解分析法。

图表计算法种类较多,其基本原理一般都是根据斜坡所处的条件,先确定某一无因次量,并绘制不同坡角情况下无因次量与稳定系数关系曲线图,或不同稳定系数情况下的无因次量与坡角关系曲线图。借助于曲线图,在已知 C 、 $tg\phi$ 、 ρ 、 a 、 β 、 H 等参数后,即可直接从关系曲线上查得稳定系数。

图表计算法与力学计算法相比较,其结果精度差些。但是,在进行边坡初步设计时是可以满足要求的。

(四) 工程地质类比法

工程地质类比法就是将所要研究的斜坡或拟设计的人工边坡与已研究

过的斜坡或人工边坡进行类比,以评价其稳定性或确定其坡角和坡高。类比时必须全面分析研究工程地质条件和影响斜坡稳定性的各项因素,比较其相似性和差异性。相似性愈高,则类比依据愈充分,所得结果愈可靠。类比的基础是相似,只有相似程度较高才可进行类比。所以类比法一定要充分做好工程地质调查研究工作,而且要有丰富的实践经验。

我国铁道、矿山、水电部门已有不少类比的实例,并提出不同条件下坡高和坡角的经验数据。被称为“坡率法”,见《建筑边坡工程技术规范》(GB50330—2002)。

八、斜坡变形与破坏的勘察要点

(一)崩塌的岩土工程勘察要点

拟建工程场地或其附近存在对工程安全有影响的危岩或崩塌时,应进行危岩和崩塌勘察。

1.崩塌勘察宜可行性研究或初步勘察阶段进行,应查明产生崩塌的条件及其规模、类型、范围,并对崩塌区做出建筑场地适宜性评价以及提出防治方案建议。

2.崩塌勘察以工程地质测绘为主,测绘的比例尺宜采用 1:500~1:1000;崩塌方向主剖面的比例尺宜采用 1:200。

3.测绘时应查明的内容是:

(1)崩塌区的地形地貌及崩塌类型、规模、范围,崩塌体的尺寸和崩落方向;

(2)崩塌区的岩性特征、风化程度和地下水的活动情况;

(2)崩塌区的地质构造、岩体结构面(断裂、节理、裂隙等)发育情况;

(4)气象、水文和地震活动情况;

(5)历史上崩塌危害及当地防治崩塌的经验等。绘制崩塌区工程地质图,并附以主剖面地质断面图。

4.当崩塌区下方有工程设施和居民点时,应对岩体张裂缝进行监测。对有较大危害的大型崩塌,应结合监测结果对可能发生崩塌的时间、规模、滚落方向、危害范围等做出预报。

5.各类危岩和崩塌的岩土工程评价应符合下列规定:

(1)规模大, I 类——落石方量大于 5000m^3 , 破坏力强, 破坏后果很严重, 难于治理的, 不宜作为工程场地, 线路应绕避;

(2)规模较大, II 类——介于 I 类与 III 类之间, 破坏后果严重, 应对可能产生崩塌的危岩进行加固处理, 线路应采取防护措施;

(2)规模小, III 类——落石方量小于 500m^3 , 破坏力小, 破坏后果不严重, 易于处理, 可作为工程场地, 但应对不稳定危岩采取治理措施。

6.崩塌区的岩土工程勘察报告除应遵守岩土工程勘察报告的一般规定之外,尚应阐明崩塌区的范围、类型、作为工程场地的适宜性, 并提出防治方案的建议。

(二)滑坡的岩土工程勘察要点

拟建工程场地或其附近存在对工程安全有影响的滑坡或有滑坡可能时,应进行专门的滑坡勘察。

1.滑坡勘察的任务和目的

(1)查明滑坡的现状，包括：滑坡周界范围、地层结构、主滑方向；平面上的分块、分条，纵剖面上的分级；滑动带的部位、倾角、可能形状；滑带岩土特性等滑坡的诸形态要素；查明各层地下水的位置、流向和性质；在滑坡体、滑坡面(带)和稳定地层中采取土试样进行试验。

(2)查明引起滑动的主要原因。在调查分析滑坡的现状和滑坡历史的基础上，找出引起滑坡的主导因素；判断是首次滑动的新生滑坡还是再次滑动的古老滑坡的复活。

(3)获得合理的计算参数。通过勘探、原位测试、室内试验、反算和经验比拟等综合分析，获得各区段(牵引段、主滑段和抗滑段)合理的抗剪强度指标。

(4)综合测绘调查、工程地质比拟、勘探及室内外测试结果，对滑坡当前和工程使用期内的稳定性做出合理评价。

(5)提出整治滑坡的工程措施或整治方案。对规模较大的滑坡以及滑坡群，宜加以避让；防治滑坡宜采用排水(地面水和地下水)、减载、支挡、防止冲刷和切割坡脚、改善滑带岩土性质等综合性措施，且注意每种措施的多功能效果，并以控制和消除引起滑动的主导因素为主，辅以消除次要因素的其他措施。

(6)提出是否要进行监测和监测方案。

2.工程地质测绘

(1)工程地质测绘与调查的范围应包括滑坡区及其邻近稳定地段，一般包括滑坡后壁外一定距离，滑坡体两侧自然沟谷和滑坡舌前缘一定距离或江、河、湖水边；测绘比例尺 1: 200~1: 1000，可根据滑坡规模选用；用于整治设计的测绘比例尺为 1: 200 或 1: 500。

(2)搜集地质、水文、气象、地震和人类活动等相关资料；

(3)注意查明滑坡的发生与地层结构、岩性、断裂构造(岩体滑坡尤为重要)、地貌及其演变、水文地质条件、地震和人为活动因素的关系，找出引起滑坡复活的主导因素。

(4)测绘、调查滑坡体上各种裂缝的分布，发生的先后顺序、切割关系；滑坡的形态要素和演化过程，圈定滑坡周界；分清裂缝的力学属性，作为滑坡体平面上的分块或纵剖面分段的依据。

(5)通过裂缝的调查、测绘，藉以分析判断滑动面的深度和倾角大小，并指导勘探工作。

(6)对岩体滑坡应注意缓倾角的层理面、层间错动面、不整合面、断层面、节理面和片理面等的调查，若这些结构面的倾向与坡向一致，且其倾角小于斜坡前缘临空面倾角，则很可能发展成为滑动面。对土体滑坡，则首先应注意土层与岩层的接触面，其次应注意土体内部的岩性差异界面。

(7)应注意测绘调查树木的异态、工程设施的变形等；滑动体上或其邻近的建筑物(包括支挡物和排水构筑物)的裂缝，但应注意区分滑坡引起裂缝与施工裂缝、不均匀沉降裂缝、自重与非自重黄土湿陷裂缝、膨胀土裂缝、温度裂缝和冻胀裂缝的差异，避免误判。

(8)调查、测绘地下水特征，泉水出露地点及流量，地表水自然排泄沟渠的分布和断面，湿地的分布和变迁情况等。

(9)围绕判断是首次滑动的新生滑坡还是再次滑动的古老滑坡进行调查。

(10)当地整治滑坡的经验。对滑坡的重点部位应摄影或录像。

3.勘探工作要点

(1)勘探工作的主要任务是查明滑坡体的地质结构、滑动面的位置、展布形状、数目和滑带岩土性质，查明地下水情况，采取岩土试样进行试验等。

(2)勘探线应在测绘、调查基础上，沿滑动主轴方向布设。根据滑坡规模和分块、分条情况，在主轴两侧亦应布设勘探线或勘探点；在各勘探线上勘探点的间距，一般不宜大于40m。在预计设置排水和支挡构筑物的地段，应有一定数量的勘探点。勘探方法除钻探和触探外，应有一定数量的探井。

(3)为直接观察地层结构和滑动面，或为原位大型剪切试验，宜布设一定数量的探井或探槽。为准确查明滑动面的位置，对于土体滑坡，可布设适量静力探点；对于岩体滑坡，可采用合适的物探手段。

(4)一般性勘探点的深度，应穿过最下一层滑动面；少量控制性勘探点的深度，应超过滑坡体前缘最低剪出口标高以下的稳定地层内一定深度，以满足滑坡治理需要。

(5)在滑坡体内、滑动面(带)和稳定地层内，均应采取足够数量的岩土试样进行试验。

(6)为查明地下水的类型、各层地下水位、含水层厚度、地下水流向、流速、流量及其承压性质，应布设专门性钻孔，或利用其他钻孔进行上述水文地质测试，必要时设置地下水长期观测孔。

(7)滑坡勘探宜采用管式钻头、全取芯钻进，土质滑坡宜采用干钻，钻进过程中应细致地观察、描述和注意钻进难易的记录。以下迹象可能是滑动面(带)位置：

①通过小间距取样(0.5m或更小)，测定和绘制含水量随深度的变化曲线，含水量最大处，可能是滑动面(带)；

②所采取岩心经自然风干，岩心自然脱开处可能是滑动面；破碎地层与完整地层的界面也可能是滑动面位置；大型、超大型滑坡可能出现地层重复现象，结合测绘调查分析判断是否属滑动面(带)；

③孔壁坍塌、卡钻、漏水、涌水、甚至套管变形、民用水井井圈错位等都可能是滑动面位置，但应结合其他情况进行综合分析判断。

4.测试和监测工作

(1)测试工作

为了验算滑坡的稳定性，必须对滑带土进行抗剪强度试验，以求取 c 、 φ 指标。土的强度试验宜符合下列要求：①采用室内、野外滑面重合剪，滑带宜作重塑土或原状土多次剪试验，并求出多次剪和残余剪的抗剪强度；②采用与滑动受力条件相似的方法；③采用反分析方法检验滑动面的抗剪强度指标。大型和重要的滑坡，则除采样进行室内试验外，还需作滑带土的原位测试。

(2)监测工作

规模较大以及对工程有重要影响的滑坡，应进行监测。滑坡监测的内容包括：滑带(面)的孔隙水压力；滑体内外地下水位、水质、水温和流量；支

挡结构承受的压力及位移；滑体上工程设施的位移等。滑坡监测资料，结合降雨、地震活动和人为活动等因素综合分析，可作为滑坡时间预报的依据。

5. 滑坡的稳定性计算应符合下列要求；

- (1)正确选择有代表性的分析断面，正确划分牵引段、主滑段和抗滑段；
- (2)正确选用强度指标，宜根据测试成果、反分析和当地经验综合确定；
- (3)有地下水时，应计入浮托力和水压力；
- (4)根据滑面(滑带)条件，按平面、圆弧或折线，选用正确的计算模型；
- (5)当有局部滑动可能时，除验算整体稳定外，尚应验算局部稳定；
- (6)当有地震、冲刷、人类活动等影响因素时，应计及这些因素对稳定的影响。

6.滑坡稳定性的综合评价，应根据滑坡的规模、主导因素、滑坡前兆、滑坡区的工程地质和水文地质条件，以及稳定性验算结果进行，并应分析发展趋势和危害程度，提出治理方案的建议。

7.滑坡勘察报告除应符合岩土工程勘察报告的一般规定之外，尚应包括下列内容；

- (1)滑坡的地质背景和形成条件；
- (2)滑坡的形态要素、性质和演化；
- (3)提供滑坡的平面图，剖面图和岩土工程特性指标；
- (4)滑坡稳定分析；
- (5)滑坡防治和监测的建议。整治方案的建议。

九、斜坡场地的防治措施

(一) 崩塌的防治

只有小型崩塌，才能防止其不发生，对于大的崩塌只好绕避。路线通过小型崩塌区时，防止的方法分防止崩塌产生的措施及拦挡防御措施。

防止产生的措施包括削坡、清除危石、胶结岩石裂隙、引导地表水流，以避免岩石强度迅速变化，防止差异风化以避免斜坡进一步变形及提高斜坡稳定性等。

- 1.爆破或打楔。将陡崖削缓，并清除易坠的岩石。
- 2.堵塞裂隙或向裂隙内灌浆。有时为使单独岩坡稳定，可采用铁链锁绊或铁夹，以提高有崩塌危险岩石的稳定性。
- 3.调整地表水流。在崩塌地区上方修截水沟，以阻止水流流入裂隙。
- 4.为了防止风化将山坡和斜坡铺砌覆盖起来。或在坡面上喷浆。
- 5.修筑明硐或御塌棚。
- 6.筑护墙及围护棚（木的、石的、铁丝网）以阻挡坠落石块，并及时清除围护建筑物中的堆积物。
- 7.在软弱岩石出露处修筑挡土墙，以支持上部岩石的质量（这种措施常用于修建铁路路基而需要开挖很深的路堑时）。

(二) 滑坡的治理

治理原则：

- 1.滑坡的治理，要贯彻以防为主、整治为辅、及时治理的原则；
- 2.尽量避开大型滑坡所影响的位置；
- 3.对大型复杂的滑坡，应采用多项工程综合治理；对中小型滑坡，应注意调整建筑物或构筑物的平面位置，以求经济技术指标最优；

4.对发展中的滑坡要进行整治，对古滑坡要防止复活；
5.对可能发生滑坡的地段要防止滑坡的发生；整治滑坡应先做好排水工程，并针对形成滑坡的因素，采取相应措施。

治理措施：

1.排水

(1) 地表排水主要是设置截水沟和排水明沟系统。截水沟是用来截排来自滑坡体外的坡面径流，在滑坡体上设置树枝状的排水明沟系统，以汇集坡面径流引导出滑坡体外。

(2) 地下排水为了排除地下水可设置各种形式的渗沟或盲沟系统，以截排来自滑坡体外的地下水流。

2.支挡

在滑坡体下部修筑挡土墙、抗滑桩或用锚杆加固等工程以增加滑坡下部的抗滑力。在使用支挡工程时，应该明确各类工程的作用。如滑坡前缘有水流冲刷，则应首先在河岸作支挡等防护工程，然后又考虑滑体上部的稳定。

3.刷方减重

主要是通过削减坡度角或降低坡高，以减轻斜坡不稳定部位的重量，从而减少滑坡上部的下滑力。如拆除坡顶处的房屋和搬走重物等。

4.改善滑动面（带）的岩土性质

主要是为了改良岩土性质、结构，以增加坡体强度。本类措施有：对岩质滑坡采用固结灌浆；对土质滑坡采用电化学加固、冻结、焙烧等。此外，还可针对某些影响滑坡滑动因素进行整治，如防水流冲刷、降低地下水位、防止岩石风化等具体措施。

第三节 泥石流

泥石流是山区特有的一种自然地质现象。它是由于降水（暴雨、冰川、积雪融化水）产生在沟谷或山坡上的一种挟带大量泥砂、石块和巨砾等固体物质的特殊洪流，是高浓度的固体和液体的混合颗粒流。俗称“走蛟”、“出龙”、“蛟龙”等。它的运动过程介于山崩、滑坡和洪水之间，是各种自然因素（地质、地貌、水文、气象等）或人为因素综合作用的结果。由于泥石流爆发突然，运动很快，能量巨大，来势凶猛，破坏性非常强，常给山区工农业生产建设造成极大危害，对山区铁路、公路的危害，尤为严重。

一、泥石流的形成条件

泥石流的形成，必须同时具备三个基本条件：

- 1.有利于贮集、运动和停淤的地形地貌条件；
- 2.有丰富的松散土石碎屑固体物质来源；
- 3.短时间内可提供充足的水源和适当的激发因素。

（一）地形地貌条件

地形条件制约着泥石流形成、运动、规模等特征。主要包括泥石流沟的沟谷形态、集水面积、沟坡坡度与坡向和沟床纵坡降等。

1.沟谷形态

典型泥石流分为形成、流通、堆积等三个区，沟谷也相应具备三种不同形态。上游形成区多三面环山、一面出口的状、漏斗状或树叶状，地势比较开阔，周围山高坡陡，植被生长不良，有利于水和碎屑固体物质聚集；中游流通区的地形多为狭窄陡深的狭谷，沟床纵坡降大，使泥石流能够迅猛直泻；

下游堆积区的地形为开阔平坦的山前平原或较宽阔的河谷,使碎屑固体物质有堆积场地。

2.沟床纵坡降

沟床纵坡坡降是影响泥石流形成、运动特征的主要因素。一般来讲,沟床纵坡降越大,越有利于泥石流的发生,但比降在10%~30%的发生频率最高,5%~10%和30%~40%的其次,其余发生频率较低。

3.沟坡地形

坡面地形是影响泥石流固体物质来源的主要因素,其作用是为泥石流直接供固体物质。沟坡坡度是影响泥石流的固体物质的补给方式、数量和泥石流规模的主要因素。一般有利于提供固体物质的沟谷坡度,在我国东部中低山区多为10~30度,固体物质的补给方式主要是滑坡和坡积、洪积堆积土层,在西部高中山区多为30~70度,固体物质和补给方式主要是滑坡、崩塌和岩屑流。

4.集水面积

泥石流多形成在集水面积较小的沟谷,面积为0.5~10平方公里者最易产生,小于0.5平方公里和10~50平方公里其次,发生在汇水面积大于50平方公里以上者较少。

5.斜坡坡向

斜坡坡向对泥石流的形成、分布和活动强度也有一定影响。阳坡和阴坡比较,阳坡巨有降水量较多,冰雪消融快,植被生长茂盛,岩石风化速度快、程度高等有利条件,故一般比阴坡发育。如我国东西走向的秦岭和喜马拉雅山的南坡产生的泥石流比北坡要多得多。

(二) 碎屑固体物源条件

某一山区能作为泥石流中固体物质的松散土层的多少,与地区的地质构造、地层岩性、地震活动强度、山坡高陡程度、滑坡、关系崩塌等地质现象发育程度以及人类工程活动强度等有直接关系。

1.与地质构造和地震活动强度的关系

地区地质构造越复杂,褶皱断层变动越强烈,特别是规模大,现今活动性强的断层带,岩体破碎十分发育,宽度可达数十条数百米,常成为泥石流丰富的固体物源。

2.与地层岩性的关系

地层岩性与泥石流固体物源的关系,主要反映在岩石的抗风化和抗侵蚀能力的强弱上。一般软弱岩层、胶结成岩作用差的岩层和软硬相间的岩层比岩性均一和坚硬的岩层易遭受破坏,提供的松散物质也多,反之亦然。

花岗岩类,由于结构构造和矿物成分的特点,物理和化学风化作用强烈,导致岩体崩解,形成块石、碎屑和砂粒,形成大厚度的风化残积层,当其它条件具备时可形成泥石流。

石灰岩分布地区,灰岩只有经物理风化和经淋溶的残积红土以及经地质构造作用的破碎带,才可能成为泥石流的固体物源。由于石灰岩具可溶性,溶蚀现象发育,塌陷、漏斗等岩溶堆积松散土多见,难以成为泥石流的固体物源,再加土岩溶地区地表水易流入地下,故灰岩地区泥石流现象少见。

除上述地质构造和地层岩性与泥石流固体物源的丰度有直接关系外,当山高坡陡时,斜坡岩体卸荷裂隙发育,坡脚多有崩塌坡积土层分布;地区滑

坡、崩塌、倒石锥、冰川堆积等现象越发育，松散土层也就越多；人类工程活动越强烈，人工堆积的松散层也就越多，如采矿弃渣、基本建设开挖弃土、砍伐森林造成严重水土流失等。这些均可为泥石流发育提供丰富的固体物源。

（三）水源条件

水既是泥石流的重要组成成分，又是泥石流的激发条件和搬运介质。泥石流水源提供有降雨、冰雪融水和水库（堰塞湖）溃决溢水等方式。

1.降雨

降雨是我国大部分泥石流形成的水源，遍及全国的 20 多个省、市、自治区，主要有云南、四川、重庆、西藏、陕西、青海、新疆、北京、河北、辽宁等，我国大部分地区降水充沛，并且具有降雨集中，多暴雨和特别大暴雨的特点，这对激发泥石流的形成起了重要作用。集中和强度较大的暴雨是促使泥石流暴发的主要动力条件。

2.冰雪融水

冰雪融水是青藏高原现代冰川和季节性积雪地区泥石流形成的主要水源。特别是受海洋性气候影响的喜马拉雅山、唐古拉山和横断山等地的冰川，活动性强，年积累量和消融量大，冰川前进速度快、下达海拔低，冰温接近融点，消融后为泥石流提供充足水源。当夏季冰川融水过多，涌入冰湖，造成冰湖溃决溢水而形成泥石流或水石流更为常见。

3.水库（堰塞湖）溃决溢水

当水库溃决，大量库水倾泄，而且下游又存在丰富松散堆积土时，常形成泥石流或水石流。特别是由泥石流、滑坡在河谷中堆积，形成的堰塞湖溃决时，更易形成泥石流或水石流。

二、泥石流的分类及其特征

（一）按泥石流成因分类

人们往往根据起主导作用的泥石流形成条件，来命名泥石流的成因类型。在我国，科学工作者将泥石流划分为冰川型泥石流和降雨型泥石流两大成因类型。另外，还有一类共生型泥石流。

冰川型泥石流：是指分布在高山冰川积雪盘踞的山区，其形成、发展与冰川发育过程密切相关的一类泥石流。它们是在冰川的前进与后退、冰雪的积累与消融，以及与此相伴生的冰崩、雪崩、冰碛湖溃决等动力作用下所产生的，又可分为冰雪消融型、冰雪消融及降雨混合型、冰崩～雪崩型及冰湖溃决型等亚类。

降雨型泥石流：是指在非冰川地区，以降雨为水体来源，以不同的松散堆积物为固体物质补给来源的一类泥石流。根据降雨方式的不同，降雨型泥石流又分为暴雨型、台风雨型和降雨型三个亚类。

共生型泥石流：这是一种特殊的成因类型。根据共生作用的方式，它们包括了滑坡型泥石流、山崩型泥石流、湖岸溃决型泥石流、地震型泥石流和火山型泥石流等亚类。由于人类不合理经济工程活动而形成的泥石流，称为“人为泥石流”，也是一种特殊的共生型泥石流。

（二）按泥石流体的物质组成分类

泥石流：这是由浆体和石块共同组成的特殊液体，固体成分从粒径小于 0.005 毫米的粘土粉砂到几米至 10~20 米的大漂砾。它的级配范围之大是其

它类型的夹沙水流所无法比拟的。这类泥石流在我国山区的分布范围比较广泛，对山区的经济建设和国防建设危害十分严重。

泥流：是指发育在我国黄土高原地区，以细粒泥沙为主要固体成分的泥质流。泥流中粘粒含量大于石质山区的泥石流，粘粒重量比可达 15% 以上。泥流含有少量碎石、岩屑，粘度大，呈稠泥状，结构比泥石流更为明显。我国黄河中游地区干流和支流中的泥沙，大多来自这些泥流沟。

水石流：是指发育在大理岩、白云岩、石灰岩、砾岩或部分花岗岩山区，由水和粗砂、砾石、大漂砾组成的特殊流体，粘粒含量小于泥石流和泥流。水石流的性质和形成，类似山洪。

（三）按泥石流流体性质分类

粘性泥石流：指呈层流状态，固体和液体物质作整体运动，无垂直交换的高容重（1.6~2.3 吨 / 米）浓稠浆体。承浮和托悬力大，能使比重大于浆体的巨大石块或漂砾呈悬移状，有时滚动，流体阵性明显，有堵塞、断流和浪头现象；流体直进性强，转向性弱，遇弯道爬高明显，沿程渗漏不明显。沉积后呈舌状堆积，剖面中一次沉积物的层次不明显，但各层之间层次分明；沉积物分选性差，渗水性弱，洪水后不易干涸。

稀性泥石流：指呈紊流状态，固液两相作不等速运动，有垂直交换，石块在其中作翻滚或跃移前进的低容重（1.2~1.8 吨 / 米）泥浆体。浆体混浊，阵性不明显，与含沙水流性质近似，有股流及散流现象。水与浆体沿流程易渗漏、散失。沉积后呈垄岗状或扇状，洪水后即可干涸通行，沉积物呈松散状，有分选性。

以上是我国常见的三种分类方案。除此之外，还有：按水源类型划分为：降雨型、冰川型、溃坝型；按地形形态划分为：沟谷型、坡面型；按泥石流沟的发育阶段划分为发展期泥石流、旺盛期泥石流、衰退期泥石流、停歇期泥石流；按泥石流的固体物质来源划分为：滑坡泥石流、崩塌泥石流、沟床侵蚀泥石流、坡面侵蚀泥石流等等。

（四）泥石流的综合分类

泥石流的综合分类综合地反映了泥石流的成因、源地特征、物质组成、流体性质、危害程度等因素，有利于区域泥石流资料的分级整理、对比、分析、电子储存；又便于定量制图。这里，介绍《规范》中应用的泥石流的工程分类。泥石流的工程分类依据定性指标和定量指标进行划分：

1. 定性指标依据泥石流的特征和流域特征两个指标将泥石流分为高频率泥石流沟谷和低频率泥石流沟谷两大类。

(1) 泥石流特征的划分依据：①泥石流发生的周期；②固体物质的来源；③泥石流形成时暴雨的强度；④泥石流形成的主要因素；⑤泥石流的规模。

(2) 泥石流流域特征的划分依据：①泥石流分布区特征；②泥石流沟谷和堆积区特征；③泥石流沟床坡降比。

2. 定量特征依据如下指标在泥石流类别的基础上又划分为三个亚类：即破坏程度为严重、中等、轻微的泥石流。

- (1) 流域面积；
- (2) 固体物质一次冲出量；
- (3) 泥石流沟谷的爆发流量；
- (4) 泥石流堆积区的面积。

依据以上指标相结合的原则，具体来划分泥石流的类型。见表 8-6。

表 8-6 泥石流的工程分类和特征

类别	泥石流特征	流域特征	亚类	严重程度	流域面积 (km ²)	固体物质一次冲出量 (×10 ⁴ m ³)	流量 (m ³ /s)	堆积区面积 (km ²)
高频率泥石流沟谷 I	基本上每年都有泥石流发生。固体物质主要来源于沟谷的滑坡、崩塌。爆发雨强小于 2~4mm/min。除岩性因素外，滑坡、崩塌严重的沟谷多发生粘性泥石流，规模大。反之，则发生稀性泥石流。	多位于强烈抬升区。岩层破碎，风化强烈，山体稳定性差。泥石流堆积新鲜，无植被或仅有稀疏草丛。粘性泥石流沟中下游坡度大于 4%。	I ₁	严重	>5	>5	>100	>1
			I ₂	中等	1~5	1~5	30~100	<1
			I ₃	轻微	<1	<1	<30	—
低频率泥石流沟谷 II	爆发周期一般在 10 年以上，固体物质主要来源于沟床，泥石流发生时“揭床”现象明显。暴雨时坡面发生的前层滑坡往往是激发泥石流形成的重要因素。爆发雨强，一般大于 4mm/min。规模一般较大，性质有粘有稀。	山体稳定性相对较好，无大型活动性滑坡、崩塌。沟床和扇形地上巨砾遍布。植被较好，沟床内灌木丛密布，扇形地多已被辟为农田。粘性泥石流沟中下游沟床坡度小于 4%。	II ₁	严重	>10	>5	>100	>1
			II ₂	中等	1~10	1~5	30~100	<1
			II ₃	轻微	<1	<1	<30	—

注：1 表中流量对高频率泥石流指百年一遇；对低频率泥石流指历史最大流量；
2 泥石流的分类宜采用野外特征与定量指标相结合的原则，定量指标满足其中一项即可。

三、泥石流勘察与场地评价

拟建工程场地或其附近有发生泥石流的条件并对工程安全有影响时，应进行专门的泥石流勘察。

1. 泥石流勘察应在可行性研究或初步勘察阶段进行，应查明泥石流的形成条件和泥石流的类型、规模、发育阶段、活动规律，并对工程场地做出适宜性评价，提出防治方案的建议。

2. 泥石流勘察应以工程地质测绘和调查为主，测绘范围应包括沟谷至分水岭的全部地段和可能受泥石流影响的地段。测绘比例尺：对全流域宜采用 1:50000；对中下游可采用 1:2000~1:10000。工程地质测绘应调查下列内容：

(1) 冰雪融化和暴雨强度一次最大降雨量、平均及最大流量、地下水活动等情况；

(2) 地形地貌特征，包括沟谷的发育程度、切割情况、坡度、弯曲、粗糙程度，并划分泥石流的形成区、流通区和堆积区，圈绘整个沟谷的汇水面积；

(3) 形成区的水源类型、水量、汇水条件、山坡坡度，岩层性质和风化程度；查明断裂、滑坡、崩塌、岩堆等不良地质作用的发育情况及可能形成泥石流固体物质的分布范围、储量；

(4)流通区的沟床纵横坡度、跌水、急弯等特征；查明沟床两侧山坡坡度、稳定程度、沟床的冲淤变化和泥石流的痕迹；

(5)堆积区的堆积扇分布范围，表面形态，纵坡，植被，沟道变迁和冲淤情况；查明堆积物的性质、层次、厚度、一般粒径和最大粒径；判定堆积区的形成历史、堆积速度估算一次最大堆积量；

6.泥石流沟谷的历史，历次泥石流的发生时间、频数、规模、形成过程、暴发前的降雨情况和暴发后产生的灾害情况；

(7)开矿弃渣、修路切坡、砍伐森林、陡坡开荒和过度放牧等人类活动情况；

(8)当地防治泥石流的经验。

3. 当需要对泥石流采取防治措施时，应进行勘探测试，进一步查明泥石流堆积物的性质、结构、厚度、固体物质含量、最大粒径、流速、流量、冲出量和淤积量。

4. 泥石流地区工程建设适宜性的评价，应符合下列要求；

(1) I₁类和II₁类泥石流沟谷不应作为工程场地，各类线路宜避开；

(2) I₂类和II₂类泥石流沟谷不宜作为工程场地，当必须利用时应采取治理措施；线路应避免直穿堆积扇，可在沟口设桥(墩)通过；

(3) I₃类和II₃类泥石流沟谷可利用其堆积区作为工程场地，但应避开沟口；线路可在堆积扇通过，可分段设桥和采取排洪、导流措施，不宜改沟、并沟；

(4)当上游大量弃渣或进行工程建设，改变了原有供排平衡条件时，应重新判定产生新的泥石流的可能性。

5. 泥石流岩土工程勘察报告，除应遵守岩土工程勘察报告的一般规定之外，尚应包括下列内容：

(1)泥石流的地质背景和形成条件；

(2)形成区、流通区、堆积区的分布和特征，绘制专门工程地质图；

(3)划分泥石流类型，评价其对工程建设的适宜性；

(4)泥石流防治和监测的建议。

四、泥石流灾害防治的基本措施

泥石流有不同的特点，相应的治理措施也应有所不同。在以坡面侵蚀及沟谷侵蚀为主的泥石流地区、应以生物措施为主、辅以工程措施；在崩塌、滑坡强烈活动的泥石流发生(形成)区，应以工程措施为主，兼用生物措施，而在坡面侵蚀和重力侵蚀兼有的泥石流地区，则以综合治理效果最佳。

1. 生物措施

泥石流防治的生物措施是包括恢复植被和合理耕牧。一般采用乔、灌、草等植物进行科学地配置营造，充分发挥其滞留降水，保持水土，调节径流等功能，从而达到预防和制止泥石流发生或减小泥石流规模，减轻其危害程度的目的。生物措施一般需要在泥石流沟的全流域实施，对宜林荒坡更需采取此种措施。但要正确地解决好农、林、牧、薪之间的矛盾，如果管理不善，很难收到预期的效果。

与泥石流工程防治措施相比较，生物防治措施具有应用范围广，投资省、风险小，能促进生态平稳，改善自然环境条件，具有生产效益，以及防治作用持续时间长的特点。生物措施初期效益一般不够显著，需三五年或更长一

些时间才可发挥明显作用, 在一些滑坡、崩塌等重力侵蚀现象严重地段, 单独依靠生物措施不能解决问题, 还需与工程措施相结合才能产生明显的防治效能, 生物措施包括林业措施、农业措施和牧业措施等各种措施, 通常在同一流域内随地形、坡度、土层厚度及其他条件的变化而因地制宜的进行具体布置。

2. 工程措施

泥石流防治的工程措施是在泥石流的形成、流通、堆积区内, 相应采取蓄水、引水工程, 拦挡、支护工程, 排导、引渡工程, 停淤工程及改土护坡工程等治理工程, 以控制泥石流的发生和危害, 泥石流防治的工程措施通常适用于泥石流规模大, 暴发不很频繁、松散固体物质补给及水动力条件相对集中, 保护对象重要, 要求防治标准高、见效快、一次性解决问题等情况。

跨越工程是指修建桥梁、涵洞从泥石流上方凌空跨越, 让泥石流在其下方排泄。根据 1977 年的考察资料, 成昆铁路沿线 249 条泥石流沟谷共修建桥梁 157 座, 涵洞 48 座, 可见桥涵跨越是通过泥石流地区的主要工程形式。

穿过工程是指修建隧道、明洞从泥石流下方穿过, 泥石流在其上方排泄。这是通过泥石流地区的又一种主要工程形式。据统计, 成昆线穿过泥石流共修建隧道、明洞和渡槽 16 座, 占全部 221 项工程的 98%。对于隧道、明洞和渡槽设计的选择, 总的原则是因地制宜。

防护工程是指对泥石流地区的桥梁、隧道、路基, 泥石流集中的山区变迁型河流的沿河线路或其他重要工程设施, 作一定的防护建筑物, 用以抵御或消除泥石流对主体建筑物的冲刷、冲击、侧蚀和淤埋等危害。防护工程主要有护坡、挡墙、顺坝和丁坝等。

排导工程的作用是改善泥石流流势, 增大桥梁等建筑物的泄洪能力, 使泥石流按设计意图顺利排泄。泥石流排导工程包括导流堤、急流槽和束流堤三种类型。导流堤的作用, 主要是在于改善泥石流的流向, 同时也改善流速。急流槽的作用, 主要是改善流速, 也改善流向。束流堤作用, 主要是改善流向, 防止漫流。导流堤和急流槽组合成排导槽, 以改善泥石流在堆积扇上的流势和流向, 让泥石流循着指定的道路排泄, 不让淤积。导流堤和束流堤组合成束导堤, 可以防止泥石流漫流改道为害。对于导流堤的布置, 堤尾方向与大河流向应力求成锐角相交。泥石流与大河汇流, 洪水互相搏击, 动能会有很大损失, 交角越小, 动能损失越小, 越容易将泥石流带走, 一般地说, 交角宜小于 45° 。

拦挡工程是用以控制组成泥石流的固体物质和雨洪径流, 削弱泥石流的流量、下泄总量和能量, 减少泥石流对下游经济建设工程冲刷、撞击和淤积等危害的工程设施。拦挡工程包括拦渣坝、储淤场、支挡工程、截洪工程四类。前三类起拦渣、滞流、固坡作用, 控制泥石流的固体物质供给。截洪工程的作用在于控制暴雨洪水径流。总的目的是削弱泥石流。对于防治泥石流的工程措施, 常须采取多种措施结合应用。最常见的有拦渣坝与急流槽相结合的拦排工程, 导流堤、拦渣坝和急流槽相结合的拦排工程, 拦渣坝、急流槽和渡槽相结合的明洞(或渡槽)工程等。防护工程也常与其他工程配合应用。多种工程措施配合使用, 比单纯采用某一种工程措施要更为有效, 也更为经济合理。

3. 全流域综合治理

泥石流的全流域综合治理,目的是按照泥石流的基本性质,采用多种工程措施和生物措施相结合,上、中、下游统一规划,山、水、林、田综合整治,以制止泥石流形成或控制泥石流危害。这是大规模、长时期、多方面协调一致的统一行动。

第四节 地震

地震指地壳表层因弹性波传播所引起的震动作用或现象。地震按其发生的原因,可分为构造地震、火山地震和陷落地震。此外,还有因水库蓄水、深井注水、采矿和核爆炸等导致的诱发地震。强烈的地震常伴随着地面变形、地层错动和房屋倒塌。由地壳运动引起的构造地震,是地球上数量最多、规模最大、危害最严重的一类地震。本节即是研究这类地震。

《岩土工程勘察规范》及《建筑抗震设计规范》(GB50011—2001)规定抗震设防烈度等于或大于6度的地区(也称为强震区或高烈度地震区),在进行场地和地基的岩土工程勘察时,必须进行强震区的地震效应勘察。

我国地处环太平洋地震带和欧亚地震带(地中海~喜马拉雅地震带)之间,地震活动非常频繁,成为世界上地震最多的国家之一,是一个多震国家,具有分布广、震源浅、强度大的特点。抗震防灾是我国工程建设重要任务之一。

一、地震的震级和烈度

地震的震级和烈度,是衡量地震的强度,既地震大小对建筑物破坏程度尺度。

(一) 地震震级

地震震级是衡量地震本身大小的尺度,由地震所释放出来的能量大小来衡量。释放的能量愈大则震级愈大。

地震所释放的能量大小,是通过地震仪记录的震波最大振幅来确定的。C. F. 李希特在1935年给震级(M)下的定义是:距震中100km处的标准地震仪在地面所记录的以微米表示的最大振幅A的对数值,即

$$M = \lg A \quad (8-10)$$

我国地震部门所使用的是非标准型地震仪,所以规定计算近震用体波震级 M_L ,计算远震用面波震级 M_s 。它们的经验公式为

$$M_L = \lg A_\mu + R(\Delta) \quad (8-11)$$

$$M_s = \lg(A_\mu/T)_{\max} + \sigma(\Delta) + c \quad (8-12)$$

$$M_s = 1.13M_L - 1.08 \quad (8-13)$$

式中 A_μ 为以微米表示的实际地动位移; $R(\Delta)$ 为起算函数,震中距和地震仪不同,此值不同,可查相应的表格, T 为面波周期; $\sigma(\Delta)$ 为面波起算函数; c 为台站校正(上述两项均可从已制好的表格中查出)。上述关系式仅适用于浅源地震。

根据李希特等的实际观测数据,求得的震源释放能量与震级之间有如下关系

$$\lg E = 11.8 + 1.5M \quad (8-14)$$

式中 E 为能量,单位为焦耳(J)。

(二) 地震烈度

地震烈度是衡量地震所引起的地面震动强烈程度的尺度。它不仅取决于地震能量，同时也受震源深度、震中距、地震传播介质的性质等因素的影响。一次地震只有一个震级，但在不同地点，烈度大小可以是不一样的。一般地说，震源深度和震中距愈小，地震烈度愈大；在震源深度和震中距相同的条件下，则坚硬基岩场地较之松软土地烈度要小些。因此，烈度是不能与震级混淆的。

地震烈度是根据地震时人们的感受、建筑物破坏、器物振动以及自然表象等宏观标志判定的。以统一尺度把各类标志相同或相近似的情况划分在一起，并按由小到大的数码顺序排列，建立烈度表。目前，世界各国所编制的烈度表有数十种。我国将地震烈度划度了 12 级。

我国制定了一般工程抗震的烈度标准。把地震烈度划分为基本烈度和设防烈度。基本烈度是指某地区在今后一定时期内（一般按 100a 考虑）和一般场地条件下可能遭受的最大地震烈度，作为工程防震抗震的基础。抗震设防烈度是按指按国家规定的权限批准作为一个地区抗震设防依据的地震烈度。主要考虑政治、经济的重要性，在基本烈度基础上进行的调整。作为勘察和设计，还需确定场地烈度和设计烈度。场地烈度是指工程群体所在地，其范围相当于厂区、居民小区和自然村或不小于 1.0km^2 的平面面积中，根据场地的具体的地质条件，在抗震设防烈度的基础上经过调整后的建筑物抗震设防烈度。设计烈度在场地烈度的基础上，衡量建筑物抗震设防要求的尺度，由场地烈度和建筑使用功能的重要性确定，是抗震设计所采用的烈度。

（三）地震动参数

地震动是由震源释放出来的地震波引起的地面运动。它是由不同频率、不同幅值（或强度）介质质点的振动在一个有限时间范围内的集合。所以通常以幅值、频谱特性和持续时间三个参数来表达地震的特点。

地震动参数是工程抗震设计的依据，不同工程对工程场地地震安全性评价的深度以及提供的参数的要求不同，这取决于工程的类型，工程的安全性，危险性以及社会影响等因素。比如对一般工业民用建筑，我国已经颁发的抗震设计规范都以基本烈度为基础来确定设防烈度，以烈度值换算成地震动峰值加速度进行抗震设计。

地震动幅值是地震振动强度的表示，通常以峰值表示的最多，如峰值加速度、峰值速度。峰值是指地震动的最大值。

地震动频谱特性就是强震地面运动对具有不同自振周期的结构的响应。震害经验表明：小震、近震及坚硬场地上的地震动容易使刚性结构产生震害，而大震、软厚场地上的地震动容易使高柔结构产生震害。这一规律从地震动的频谱特性去理解就很容易解释，前一种地震动的高频比较丰富，而后一种则以低频含量较强，由于共振效应，前者易使高频结构受到破坏，后者易使低频结构受损。

地震动的持续时间震害及对结构的影响，主要发生在结构反应进入非线性化之后，持时的增加使出现较大永久变形的概率提高，持时愈长，则反应愈大，产生震害的积累效应。

二、地震效应

在地震影响范围内所出现的各种震害或破坏，称之为地震效应。地震效应首先取决于震级大小、震源深度和震中距离，也与场地工程地质条件和建筑物的类型及结构有关。分为振动破坏效应和地面破坏效应两个方面。

(一) 振动破坏效应

地震波传播引起强烈的地面运动，是地基、基础和上部结构都发生振动而直接引起建筑物破坏的作用，称为振动破坏效应。在场地地震效应中振动破坏效应是最主要的。

地震动作为一种特殊的地震荷载，对于工程有重要意义的是估计地震动特征并给出场地的地震动设计参数。

国家标准《建筑抗震设计规范》(50011—2001)考虑到了场地岩土特征周期和结构自震周期的作用，给出了水平地震力的计算公式：

$$F_{EK} = \alpha G_{eq} \quad (8-15)$$

- 式中： F_{EK} —结构总水平地震作用标准值；
- α —相应于结构基本自振周期的水平地震力影响系数；
- G_{eq} —结构等效总重量。

式(8-15)中的水平地震力影响系数为一无量纲参数，表示弹性结构在地震作用下的最大加速度与重力加速度的统计平均值，即 $\alpha = \alpha_{E_{max}}/g$ 。其值的大小根据烈度、场地类别、设计地震分组和结构自振周期以及阻尼比确定，取决于地震加速度记录 $a(t)$ 和建筑物结构的动力特性(自振周期 T 和阻尼比 ζ)。由于预测给定地区在未来地震发生时可能的加速度记录 $a(t)$ 有困难，规范规定按图 8-5 采用，进行抗震验算时 α_{max} 的值按表 8-7 采用。

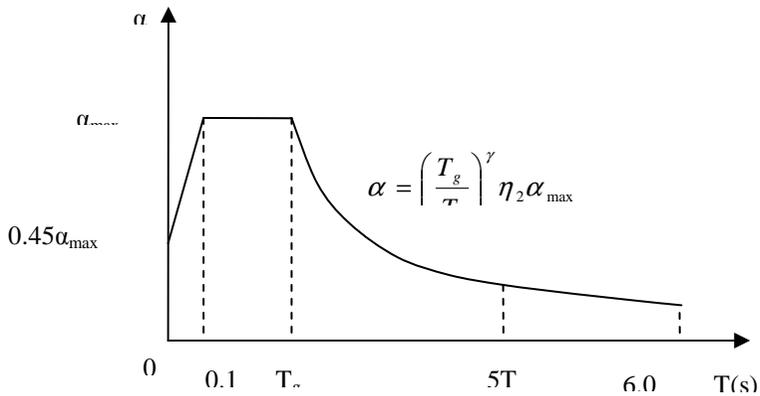


图 8-5 地震影响系数曲线

表 8-7 水平地震影响系数最大值

地震影响	6 度	7 度	8 度	9 度
多遇地震	0.04	0.08(0.12)	0.16(0.24)	0.32
罕遇地震	—	0.50(0.72)	0.90(1.20)	1.40

注：括号中数值分别用于设计基本地震加速度为 0.15g 和 0.30g 的地区。

图 8-11 中的岩土特征周期 (T_g)，也称为卓越周期。地震发生时，地震

发出的地震波传至地表岩土体，迫使其振动。由于地表岩土体对不同周期的地震波有选择放大作用，某种岩土体总是以某种周期的波放大的尤为明显而突出，使地震记录图上的这种波记录的多而好，这种周期即为该岩土的特征周期。特征周期的实质是波的共振，即地震波周期与地表岩土体的自振周期相同的共振作用，而是地表振动加强。一般来说，土质愈松软，表土层愈厚，则特征周期值愈大。我国现行抗震规范中，根据场地类别和设计地震分组给出特征周期的经验值见表 8-8。

表 8-8 岩土特征周期值 (S) 表

设计地震分组	场地类别			
	I	II	III	IV
第一组	0.25	0.35	0.45	0.65
第二组	0.30	0.40	0.55	0.75
第三组	0.35	0.45	0.65	0.90

建筑的地基设计特征周期应根据其所在地的设计地震分组和场地类别确定。规范中规定的设计地震共分为三组。我国主要城镇(县级及县级以上城镇)中心地区的抗震设防烈度、设计基本地震加速度值和所属的设计地震分组，可按《建筑抗震设计规范》附录采用。

勘察中确定建筑场地的设计基本地震加速度是指 50 年设计基准期超越概率 10% 的地震加速度的设计取值，按规范要求应符合表 8-9 依据抗震设防烈度确定。其中抗震设防烈度 7 度和 8 度的地区，设计基本地震加速各有 0.1g、0.15g 和 0.2g、0.30g 的分区。一般情况下，抗震设防烈度和设计基本地震加速度可按《建筑抗震设计规范》附录确定或采用中国地震动参数区划图确定。

表 8-9 抗震设防烈度和设计基本地震加速度值的对应关系

抗震设防烈度	6	7	8	9
设计基本地震加速度值	0.05g	0.10(0.15)g	0.20(0.30)g	0.40g

注：g 为重力加速度。（二）地面破坏效应

地面破坏效应可分为地面破裂效应和地基失效以及斜坡破坏效应。地面的破坏效应指的是强震导致地面出现的断层和地裂缝，从而引起跨越破裂带及其附近的建筑变形或破坏。地基时效是指地震使软土震陷、砂土液化及其淤泥塑流变形等，从而导致地基失效。斜坡破坏效应是指地震荷载作用所导致的边坡岩土体失稳破坏。

1. 地面破裂效应

强震时地面出现的地震断层和地裂缝，按形成机制又可分为构造性的和非构造性的两种。构造性地裂缝对应于一定的震源机制，具有明显的力学机制和一定的方向性，且分布受地震断层控制。构造性地裂缝的形成机制是：当震源断层发生地震时，由深部向上传播的地震波，使地面土层产生大幅度振动，当质点位移超过其弹性极限时，便产生永久性的塑性变形。非构造地裂缝是由于地震力作用而使某一部分岩土体沿重力方向产生的相对位移，所以也叫重力性地裂缝。重力性地裂缝多出现在土质较软弱的斜坡地段或下卧层倾斜的平坦地段。

2. 地基失效

强震时的地震加速度很大，如果建筑物地基受地震荷载作用后产生强烈

的变形以至破坏，危及建筑物的稳定，即为地基失效。按形成机制分为地震震陷、地基水平滑移和地震液化等。

地基震陷一般产生于沉积年代较新的淤泥质土等软土地基，是软土在地震力的周期作用下突然产生固结下沉的现象。其机理是饱水软土在振动力作用下触变，土体突然液化而变为塑流甚至悬液状态。

我国《软土地区工程地质勘察规范》规定，在基本烈度 ≥ 7 度的软土地基，采用天然地基的建筑物，符合下列条件时应对其地震沉陷进行分析计算：①一级建筑物和对沉陷有严格要求的二级建筑物应进行专门的震陷分析计算；②对沉降无特殊要求的二级建筑物和对沉降敏感的三级建筑物，当无条件进行专门的分析计算时，可按表 8-10 的参考值或地区经验确定；③当地基土实际条件与表 8-19 中的两项条件相比，只有一项不符合时，应按实际条件的变化大小和建筑物性质和结构类型，适当地减少震陷值，当条件都不符合时，可不考虑震陷对建筑物的影响。

表 8-10 二、三级建筑物地震震陷估算参考值表

震陷估算值	基本烈度		
	7	8	9
地基土条件			
地基主要受力层深度内软土厚度 $> 3\text{m}$ 地基土承载力标准值 $\leq 70\text{kPa}$	≤ 30	150	> 350

地基水平滑移主要发生在较陡的斜坡地段，由于地震时附加水平地震力作用，使斜坡失稳而危及斜坡上、下的建筑物。此外，斜坡半填半挖形成的地基也可能发生水平滑移。

地震液化的问题，将在下一部分介绍。

3. 斜坡的破坏效应

斜坡的破坏效应包括有地震导致的、滑坡和泥石流等，主要发生在山岳和丘陵地区，可能导致严重的次生灾害。伴随着地震而产生的山崩、滑坡等，会酿成严重的灾害。对山体崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害的调查评价，可参考本章有关内容。

三、强震区场地土类型、场地类别和建筑地段的划分

(一) 场地土的类型

强震区进行勘察时，首先应确定建筑场地各层场地土的类别，场地土的类别依据岩土的类型及岩土层的剪切波速来确定。

(二) 场地覆盖层厚度的确定

建筑场地覆盖层厚度的确定，应符合下列要求：

1. 一般情况下，应按地面至剪切波速大于 500m/s 的土层顶面的距离确定。
2. 当地面 5m 以下存在剪切波速大于相邻上层土剪切波速 2.5 倍的土层，且其下卧岩土的剪切波速均不小于 400m/s 时，可按地面至该土层顶面的距离确定。
3. 剪切波速大于 500m/s 的孤石、透镜体，应视同周围土层。
4. 土层中的火山岩硬夹层，应视为刚体，其厚度应从覆盖土层中扣除。

表 8-11 场地土的类型划分表

场地土类型	岩土名称和性状
坚硬场地土	稳定的岩石，密实的碎石土； $v_s > 500$
中硬场地土	中密、稍密的碎石土，密实、中密的砾、粗、中砂； $f_{ak} > 200$ 的粘性土和粉土， $500 \geq v_s \geq 250$
中软场地土	稍密的砾、粗、中砂，除松散外的细粉砂， $f_{ak} \leq 200$ 的粘性土和粉土， $f_{ak} \geq 130$ 的填土， $250 \geq v_s > 140$
软弱场地土	淤泥和淤泥质土，松散的砂，新近沉积的粘性土和粉土， $f_{ak} < 130$ 的填土； $v_s \leq 140$

注： f_k 为由载荷试验等方法得到的地基承载力的特征值 (kPa)， v_s 为岩土剪切波速 (m/s)。

(三) 岩土层的剪切波速

土层的等效剪切波速，应按下列公式计算：

$$v_{se} = d_0 / t \tag{8-16}$$

$$t = \sum_{i=1}^n (d_i / v_{si}) \tag{8-17}$$

式中： v_{se} ——土层等效剪切波速(m/s)；

d_0 ——计算深度(m),取覆盖层厚度和 20m 二者的较小值；

t ——剪切波在地面至计算深度之间的传播时间；

d_i ——计算深度范围内第 i 土层的厚度(m)；

v_{si} ——计算深度范围内第 i 土层的剪切波速(m/s)；

n ——计算深度范围内土层的分层数。

(四) 建筑场地类别的划分

建筑的场地类别，应根据土层等效剪切波速和场地覆盖层厚度按表 8-12 划分为四类。

表 8-12 建筑场地类别的划分

等效剪切波速(m/s)	场地类别			
	I	II	III	IV
$v_{se} > 500$	0			
$500 \geq v_{se} > 250$	<5	≥ 5		
$250 \geq v_{se} > 140$	<3	3~50	>50	
$v_{se} \leq 140$	<3	3~15	>15~80	>80

(五) 建筑地段的划分

选择建筑场地时，应按表 8-13 划分对建筑抗震有利、不利和危险的地段。

表 8-13 各类建筑地段的划分

地段类型	地质、地形、地貌
有利地段	坚硬土或开阔、平坦、密实、均匀的中硬土等
不利地段	软弱土、液化土，条状突出的山嘴，高耸孤立的山丘，非岩质的陡坡、河岸和边坡边缘，平面分布上成因、岩性、状态明显不均匀的土层（如故河道、断层破碎带、暗埋的塘滨沟谷及半填半挖地基）等
危险地段	地震时可能发生滑坡、塌陷、地陷、地裂、泥石流等及发震断裂带上可能发生地表位错的部位

四、地震液化及其判别

松散饱水的土体在地震和动力荷载作用下，受到强烈振动而丧失抗剪强度，土颗粒处于悬浮状态，致使地基失效的现象，称振动液化。这种现象多发生在砂土地基中，故称砂土液化。

地震液化造成了地面下沉、地表塌陷、地面流滑及地基土承载力丧失等宏观震害现象，它们对工程设施皆有危害性。

（一）影响地震液化的因素

1. 土的类型与性质

宏观考察表明，细砂土和粉砂土最易液化，但随着地震烈度的增高，粉土、中砂土等也会发生液化。根据统计资料，最易发生液化的粒度组成特征值是：平均粒径(D_{50})为 0.02~0.10mm；粘粒(粒径<0.005)含量 $\rho_c < 10\%$ ；不均匀系数(η)为 2~8；相对密度(D_r)不大于 75%；级配不连续的土粒径<1mm 的颗粒含量大于 40%；)塑性指数(I_p)不大于 10。

砂土的密实度也是影响液化的主要因素之一，松砂极易液化，密实砂则不易液化。一般情况是：相对密度 $D_r < 50\%$ 的砂土在振动作用下很快液化； $D_r > 80\%$ 时不易液化。

饱水砂土的成因和堆积年代对液化的影响也不容忽视。一般大范围地震液化的地区，多为沉积年代较新的滨海平原、河口三角洲和河流堆积物区，一般土体结构疏松，地下水埋藏浅。如唐山大地震，只发生在冀东平原一带，其中又以滦河口三角洲为主，松散堆积物大多是新石器时代以来形成的。近年来历次地震震后调查发现，发生液化处所多为全新世乃至近代海相及河湖相沉积平原，河口三角洲，特别是洼地，河流的泛滥地带，河漫滩，古河道，滨海地带及人工填土地带等。

2. 液化土体的埋藏分布条件疏松砂层埋藏愈浅，上覆不透水的粘性土盖层愈薄，地下水位埋深愈小时，液化所需的超孔隙水压力就愈小，愈易液化。据资料，饱水砂层埋深大于 15~20 米时难于液化。此外，地下水埋深大于 5 米时，液化现象极少。最大液化深度：一般认为液化判别应在地下 15m 深度范围内进行。最大液化深度可达 20m，但对一般浅基础而言，即使 15m 以下液化，对建筑物影响也极轻微。最大地下水位深度：喷砂冒水严重的地区，地下水埋深一般不超过 3m，甚至不足 1m，深为 3~4m 时喷砂冒水现象少见，超过 5m 没有喷砂冒水实例。

3. 地震动的强度和历时

地震动是液化的动力来源。地震遇强，历时愈长，则愈易引起液化作用，而且，波及范围愈广，破坏愈严重。

（二）地震液化的判别

《建筑抗震设计规范》(GB50011—2001)规定对存在饱和砂土和饱和粉

土(不含黄土)的地基,除6度设防外,应进行液化判别;存在液化土层的地基,应根据建筑的抗震设防类别、地基的液化等级,结合具体情况采取相应的措施。

1.首先根据地层条件,进行初步判别:饱和土液化判别和地基处理,6度时,一般情况可不考虑,但对液化沉降敏感的乙类建筑物可按7度考虑,7~9度时,乙类建筑物可按原烈度考虑。

2.饱和砂土或粉土为第四纪晚更新世(Q₃)及其以前的可判不液化,当粉土的粘粒(粒径小于0.005mm的颗粒)含量百分率,7度、8度和9度分别不小于10、13和16时,可判为不液化;采用天然地基的建筑,当上覆非液化土层厚度和地下水位深度符合下列条件之一时,可不考虑液化影响:

$$d_u > d_o + d_b - 2 \quad (8-18)$$

$$d_w > d_o + d_b - 3 \quad (8-19)$$

$$d_u + d_w > 1.5d_o + 2d_b - 4.5 \quad (8-20)$$

式中: d_w ——地下水位深度, m, 宜按建筑物使用期内年平均最高水位,也可按近期内年最高水位;

d_o ——上覆非液化土层厚度, m, 计算时应将淤泥和淤泥质土层排除;

d_b ——基础埋置深度, m, 不超过2m时采用2m;

d_u ——液化土特征深度, m, 可按表8-14采用。

表 8-14 液化土特征深度(m)

饱和土类别	7度	8度	9度
粉土	6	7	8
砂土	7	8	9

3.当初判认为需进一步进行液化判别时,应用标准贯入实验判别法判别地面下15m深度范围内的液化;当采用桩基或埋深大于5m的深基础时,尚应判别15~20m范围内土的液化。当饱和土标准贯入锤击数(未经杆长修正)小于液化判别标准贯入锤击数临界值时,应判为液化土。当有成熟经验时,尚可采用其他判别方法。在地面下15m深度范围内的液化土应符合下式要求:

$$N < N_{cr} \quad (8-21)$$

$$N_{cr} = N_o [0.9 + 0.1(d_s - d_w)] \sqrt{\frac{3}{\rho_c}} \quad (d < 15\text{m}) \quad (8-22)$$

在地面下15~20m范围内,液化判别标准贯入锤击数临界值可按下式计算:

$$N_{cr} = N_o (2.4 - 0.1d_s) \sqrt{\frac{3}{\rho_c}} \quad (15 < d_s < 20) \quad (8-23)$$

式中 N ——饱和土标准贯入击数实测值(未作杆长修正);

N_{cr} ——液化判别标准贯入击数临界值;

N_o ——液化判别标准贯入击数基准值,应按表8-15采用;

d_s ——饱和土标准贯入点深度, m;

ρ_c ——粘粒含量百分率,当小于3或为砂土时,均应采用3。

表 8-15 标准贯入击数基准值 N_c 。

设计地震分组	烈度 (度)		
	7	8	9
第一组	6 (8)	10 (13)	16
第二、三组	8 (10)	12 (15)	18

注：括号内数值用于设计基本地震加速度为 0.15g 和 0.30g 的地区。

4.存在液化土层的地基，应进一步探明各液化土层的深度和厚度，并按下式计算液化指数：

$$I_{LE} = \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{N_i}{N_{cr}} \right) d_i W_i \quad (8-24)$$

式中： I_{LE} ——液化指数；

n ——在判别深度范围内每一个钻孔标准贯入试验点的总数；

N_i 、 N_{cr} ——分别为 i 点标准贯入锤击数的实测值和临界值，当实测值大于临界值时应取临界值的数值；

d_i —— i 点所代表的土层厚度，m。可采用与该标贯试验点相邻的上、下两标贯试验点深度差的一半，但上界不小于地下水位深度，下界不大于液化深度；

W_i —— i 土层考虑单位土层厚度的层位影响权函数值， m^{-1} 。若判别深度为 15m，当该层中点深度不大于 5m 时应采用 10，等于 15m 时应采用零值，5~15m 时应按线性内插法取值；若判别深度为 20m，当该层中点深度不大于 5m 时应采用 10，等于 20m 时应采用零值，5~20m 时应按线性内插法取值。

根据液化指数按表 8-16 划分液化等级。

表 8-16 液化等级

液化等级	轻微	中等	严重
判别深度为 15m 时的液化指数	$0 < I_{LE} \leq 5$	$5 < I_{LE} \leq 15$	$I_{LE} > 15$
判别深度为 20m 时的液化指数	$0 < I_{LE} \leq 6$	$6 < I_{LE} \leq 18$	$I_{LE} > 18$

五、地震液化的防治措施

地震液化的常用防治措施有：合理的选择建筑场地、地基处理、基础和上部结构选择等。

在强震区应合理的选择建筑场地，以尽量避开可能液化土层分布的地段。一般应以地形平坦、地下水埋藏较深、上覆非液化土层较厚的地段作为建筑场地。

地基处理可以消除液化可能性或减轻其液化程度。地震液化的地基处理措施很多，主要有换土、增加盖重、强夯、振冲、砂桩挤密爆破振密和围封等方法，可以部分或全部消除液化的影响。

建立于液化土层上的建筑物，若为低层或多层建筑，以整体性和刚度较好的筏基、箱基和钢筋混凝土十字形条基为宜。若为高层建筑，则应采用穿过液化土层的深基础，如桩基础、管桩基础等，以全部消除液化的影响，切不可采用浅摩擦桩。此外，应增强上部结构的整体刚度和均匀对称性，合理设置沉降缝。

由于建筑物类别和地基的液化等级不同，所以抗液化措施应按下表选用。

表 8-17 液化防治措施的选择

建筑抗震设防类别	地基的液化等级		
	轻微	中等	严重
乙类	部分消除液化沉陷，或对基础和上部结构处理	全部消除液化沉陷，或部分消除液化沉陷且对基础和上部结构处理	全部消除液化沉陷
丙类	基础和上部结构处理，亦可不采取措施	基础和上部结构处理，或更高要求的措施	全部消除液化沉陷，或部分消除液化沉陷且对基础和上部结构处理
丁类	可不采取措施	可不采取措施	基础和上部结构处理，或其它经济的措施

六、场地条件对震害的影响

(一) 岩土类型及地层结构的影响

1. 地基刚性：地基刚性是指地基的软弱程度。一般情况是，软土上的震害要比硬土上的大，烈度差值可达 2~3 度。土质愈软弱，其特征周期愈短，所以在软土地基上的高耸建筑物因共振作用，破坏就较低矮建筑严重得多。

2. 土层厚度：冲积层厚度与震害成正相关关系。其原因是土层愈厚，长周期的频谱成分愈显著，其特征周期愈长，位于其上具有较长周期的柔性结构就会与之产生共振，使震害加剧。

3. 软土夹层及液化层：软土地基对建筑物抗震是极为不利的。但地基内一定深度内存在软土夹层时，反而有利于建筑物的抗震稳定性。地震液化在宏观震害中也有双重作用，只要液化层上覆有一定厚度的较硬稳定土层时，液化层确实可起到隔震作用。

(二) 地形地貌的影响

总的趋势是突出孤立的地形使地震动加强，震害加剧；而低洼平坦的地形则使地震动减弱，震害相对减弱。其原因是孤突的地形使山体共振或山体内地震波多次反射，而引起地面位移、速度和加速度的发大，使震害加重，而低洼平坦地形则相反。

(三) 断裂的影响

由于发震断裂是引起建筑物结构震动破坏和地表变形破坏的源泉，应在场地选择时避开主断裂带。其避让距离不宜小于表 8-18 对发震断裂最小避让距离的规定。

表 8-18 发震断裂的最小避让距离(m)

烈度	建筑抗震设防类别			
	甲	乙	丙	丁
8	专门研究	300m	200m	—
9	专门研究	500m	300m	—

(四) 地下水的影响

地下水对震害的影响也是显著的，一般的情况是：地下水位埋深愈浅，其震害愈重；尤其是较松软的土层，地下水埋深的影响更为显著。一般地说，地下水位埋深在 0~5m 范围内影响最为明显；当埋深大于 10m 时，就可不考虑它的影响了。

七、抗震设计原则及建筑物抗震措施

(一) 建筑场地的选择

《建筑抗震设计规范》(GB50011—2001) 规定**建筑应根据其使用功能的重要性分为甲类——特殊要求的建筑物，如遇地震破坏会导致严重后果的建筑等；乙类——国家重点抗震城市的生命线工程的建筑；丙类——甲、乙、丁类以外的建筑；丁类——次要的建筑等四个建筑抗震设防类别。选择建筑场地，应根据工程需要、建筑物类别、地震活动情况、工程地质和地震地质的有关资料，对抗震有利、不利和危险地段做出综合评价。对不利地段，应提出避开要求；当无法避开时应采取有效措施；不应在危险地段建造甲、乙、丙类建筑。**

强震区建筑物场地的选择是强震区岩土工程勘察的重要任务。为做好此项工作，必须在岩土工程勘察的基础上进行综合分析。同时应指出场地对抗震有利和不利的条件，提出建筑物抗震措施的建议。选择建筑场地时应注意以下几点：

场地岩土工程勘察，应根据实际需要划分对建筑有利、不利和危险地段，提供建筑的场地类别和岩土地震稳定性（如滑坡、崩塌、液化和震陷特性等）评价，对需要采用时程分析法补充计算的建筑，尚应根据设计要求提供土层剖面、场地覆盖层厚度和有关的动力参数。

1. 尽可能避开强烈振动效应和地面效应的地段作场地或地基。属此情况的有淤泥土层、饱水粉细砂层、厚填土层以及可能产生不均匀沉降的地基。

2. 避开活动性断裂带和与活断裂有联系的断层，尽可能避开胶结较差的大断裂破碎带。

3. 避开不稳定的斜坡或可能会产生斜坡效应的地段，例如，已有崩塌、滑坡分布的地段、陡山坡及河坎旁。

4. 避免将孤立突出的地形位置作建筑场地。

5. 尽可能避开地下水位埋深过浅的地段作建筑场地。

6. 岩溶地区存在浅埋大溶洞时，不宜作建筑场地。

对抗震有利的建筑场地条件应该是：地形平坦开阔；基岩或密实的硬土层；无活动断裂破碎带；地下水位埋深较大；崩塌、滑坡、岩溶等不良地质现象不发育。

(二) 持力层和基础方案的选择

场地选定后，就要为各类建筑选择适宜的持力层和基础方案。地基持力层应以基岩或硬土为好，避免以高压缩性及液化土层作持力层。若地表有

此种土层则应采用桩基础，支承于下部的硬基上；切忌采用摩擦桩。也可预先将松软、液化土层加固处理，并采用整体性和刚性较强的筏片基础和箱形基础，基础砌置深度要大些，以防止水平地震力作用时建筑物的倾倒。同一建筑物的基础，不宜跨越在性质显著不同或厚度变化很大的地基土上。同一建筑物不要并用几种不同型式的基础。

（三）建筑物结构类型的选择及抗震措施

强震区房屋建筑与构筑物的平面和立面应力求简单方整，尽量使其质量中心与刚度中心重合，避免不必要的凹凸形状。若必须采用平面转折或立面层数有变化的型式，应在转折处或连接处留抗震缝。结构上应尽量做到减轻重量、降低重心、加强整体性，并使各部分构件之间有充分的刚度和强度。

我国城乡低层和多层建筑物广泛采用的是木架结构和砖混承重墙结构。木架结构侧向刚度很差，地震时极易发生倾斜及散架落顶。其抗震措施主要是采用角撑、铁夹板等加强侧向刚度和整体性。砖混承重墙结构整体性差，强震时混凝土预制楼盖板极易从墙上脱落；还有，砌筑砖墙的灰浆在水平地震力作用下也会发生剪切错开。抗震措施主要有：每隔一定高度于灰缝内配置拉接钢筋；楼盖板周围设置圈梁，盖板与圈梁之间最好锚固起来；外墙的四角及其他部位用竖筋补强，并使之与圈梁及基础固定；用优质灰浆咬岔砌筑墙体。

强震区的高层建筑应采用侧向刚度大的结构体系。一般高层建筑可采用框架结构和剪力墙结构体系，超高层建筑采用筒式结构体系。烟囱、水塔高度在 40m 以上的，必须采用钢筋混凝土结构；40m 以下的可砖砌，但要配置圈梁和竖向钢筋，并将它们锚固起来。高耸的电视塔则应采用整体性和强度均很高的钢骨结构体系。

八、强震区场地勘察要点

抗震设防烈度等于或大于 6 度的地区，应进行场地和地基地震效应的岩土工程勘察，并应根据国家批准的地震动参数区划和有关的规范，提出勘察场地的抗震设防烈度、设计基本地震加速度和设计特征周期分区。

（一）历史地震调查

历史地震勘察以宏观震害调查为主。在工作中，不仅在震中区需要重点调查近场震害，对远场波及区也要给予注意。在方法上，不仅要注意研究场地条件与震害的关系，而且还要研究其震害发生的机制及过程，并评价其最终结果。在进行地面调查的同时，还需作必要的勘探测试工作。其目的在于查明地面震害与地下岩土类型、地层结构及古地貌特征等各方面的关系，用以指导未来的抗震设防工作。

宏观震害调查包括：不同烈度区的宏观震害标志、地表永久性不连续变形（断裂、地裂缝）、地震液化、震陷和崩塌、滑坡等。预测调查场地、地基可能发生的震害。根据工程的重要性、场地条件及工作要求分别予以评价，并提出合理的工程措施。

（二）勘察要求

1.在抗震设防烈度等于或大于 6 度的地区进行勘察时，应划分场地土的类型和建筑场地类别，划分对抗震有利、不利或危险的地段。

2.抗震设防烈度为 6 度时，可不考虑液化的影响，但对沉陷敏感的乙类建筑，可按 7 度进行液化判别。甲类建筑应进行专门的液化勘察。

3.场地地震液化判别应先进行初步判别，当初步判别认为有液化可能时，应再作进一步判别。液化的判别宜采用多种方法，综合判定液化可能性和液化等级。

4.为划分场地类别布置的勘探孔，当缺乏资料时，其深度应大于覆盖层厚度。当覆盖层厚度大于 80m 时，勘探孔深度应大于 80m，并分层测定剪切波速。10 层和高度 30m 以下的丙类和丁类建筑，无实测剪切波速时，可按现行国家标准《建筑抗震设计规范》(GB50011)的规定，按土的名称和性状估计土的剪切波速。

5.缺乏历史资料和建筑经验的地区，应根据设计要求，提供土层剖面、地面峰值加速度、场地特征周期、覆盖层厚度和剪切波速度等有关参数。任务需要时，可进行地震安全性评估或抗震设防区划。

6.液化初步判别除按现行国家有关抗震规范进行外，尚宜包括下列内容进行综合判别：

- (1)分析场地地形、地貌、地层、地下水等与液化有关的场地条件；
- (2)当场地及其附近存在历史地震液化遗迹时，宜分析液化重复发生的可能性；
- (3)倾斜场地或液化层倾向水面或临空面时，应评价液化引起土体滑移的可能性。

7.地震液化的进一步判别应在地面以下 15m 的范围内进行；对于桩基和基础埋深大于 5m 的天然地基，判别深度应加深至 20m。对判别液化而布置的勘探点不应少于 3 个，勘探孔深度应大于液化判别深度。

8.地震液化的进一步判别，除应按现行国家标准《建筑抗震设计规范》(GB50011)的规定执行外，尚可采用其他成熟方法进行综合判别。当采用标准贯入试验判别液化时，应按每个试验孔的实测击数进行。在需作判定的土层中，试验点的竖向间距宜为 1.0~1.5m，每层土的试验点数不宜少于 6 个。

9. 按现行国家标准《建筑抗震设计规范》(GB50011)的规定**在饱和砂土和饱和粉土（不含黄土）的地基，除 6 度设防外，应进行液化判别；存在液化土层的地基，应根据建筑物的抗震设防类别、地基的液化等级，结合具体情**

勘察报告除应阐明可液化的土层、各孔的液化指数外，尚应根据各孔液化指数综合确定场地液化等级。

10.抗震设防烈度等于或大于 7 度的厚层软土分布区，宜判别软土震陷的可能性和估算震陷量。

11.场地或场地附近有滑坡、滑移、崩塌、塌陷、泥石流、采空区等不良地质作用时，应进行专门勘察，分析评价在地震作用时的稳定性。

12.重要城市和重大工程应进行断裂勘查。必要时宜作地震危险性分析或地震小区划和震害预测。

第五节 活动断裂

一、活动断裂的含义及研究意义

活动断裂(也称为活断层)一般是指现今正在活动的断裂，或近期曾活动

过、不久的将来可能会重新活动的断裂。

断裂的工程分类可分为全新活动断裂和非全新活动断裂两种，活动断裂主要指前者。全新活动断裂为在全新地质时期(一万年)内有过地震活动或近期正在活动，在今后一百年可能继续活动的断裂；全新活动断裂中、近期(近500年来)发生过地震震级 $M \geq 5$ 级的断裂，或在今后100年内，可能发生 $M \geq 5$ 级的断裂，可定为发震断裂。全新活动断裂可按表 8-19 分级。非全新活动断裂：一万年以前活动过，一万年以来没有发生过活动的断裂。

表 8-19 全新活动断裂分级

指标		活动性	平均活动速率 $v(\text{mm/a})$	历史地震震级 M
断裂分级				
I	强烈全新活动断裂	中晚更新世以来有活动，全新世活动强烈	$v > 1$	$M \geq 7$
II	中等全新活动断裂	中晚更新世以来有活动，全新世活动较强烈	$1 \geq v \geq 0.1$	$7 > M \geq 6$
III	微弱全新活动断裂	全新世有微弱活动	$v < 1$	$M < 6$

活动断裂对工程建筑物安全的威胁主要来自断层错动~突发错动（产生地震的粘滑）和缓慢错动（不产生地震的蠕滑）。前者往往和地震相伴随，在我国大陆区震级为 6.3~4 以上的地震才能产生不同规模的地表破裂带和地表位移。而蠕滑也可以产生地表位移和地面破裂，但其形成过程是一个缓慢的应变积放过程，其位移量也是一种缓慢的积累过程。无论哪种方式的位移都会对工程建筑物造成威胁，因而对活动断裂进行工程地质研究和工程安全评价非常必要。

二、活断层的特性

（一）活动断裂是深大断裂复活运动的产物

国内外大量的研究表明，活动断裂往往是地质历史时期产生的深大断裂，在晚近期及现代地壳构造应力条件下重新活动而产生的。深大断裂指的是切穿岩石圈、地壳或基底的断裂，其延伸长度达数十、数百、甚至数千公里，切割深度数公里至百余公里。复活运动的标志是地震活动和地热流异常等，尤其是那些走滑型活动断裂最易伴生强震，形成地震带。例如，我国川西的安宁河地震带和则木河地震带。

（二）活动断裂的继承性和反复性

研究资料表明，活动断裂往往是继承老的断裂活动的历史而继续发展的，而且现今发生地面断裂破坏的地段过去曾多次反复地发生过同样的断层运动。

我国活动断裂的分布，总体来说是继承了老的断裂构造，尤其是中生代和第三纪以来断裂构造的格架。这些断裂处于由几个板块相互作用所控制的现代地应力场中而继续活动，并在一定程度上发育了新的活动部位。根据活动断裂的类型和活动方向，东部地区以 NE 和 NNE 走向的正断层和走滑~正断层为主，西部地区以 NW 和 NWW 走向的走滑和逆冲~走滑断层为主。而且西部地区的活动强度明显大于东部，一些巨大的活动断裂带控制了强震

孕育和发生。

一些活动构造带的古地震震中总是沿活动性断裂有规律地分布,岩性和地貌错位反复发生,累积叠加,其中尤以走滑断层最为明显。

(三) 活动断裂的活动方式

活动断裂的活动方式基本有两种

1.以地震方式产生间歇性地突然滑动,称地震断层或粘滑型断层。

2.沿断面两侧岩层连续缓慢地滑动,称蠕变断层或蠕滑型断层。

一般认为:粘滑型断层的围岩强度高,断裂带锁固能力强,能不断积累应变能。当应力达到围岩强度极限后产生突然滑动,迅速而强烈地释放应变能,造成大的地震。所以沿这种断层往往有周期性地震活动。蠕滑型断层主要发育在围岩强度低,断裂带内含有软弱充填物,或孔隙液压和地温的高异常带内,断裂带锁固能力弱,不能积累较大的应变能,在受力过程中易于发生持续而缓慢的滑动。断层活动一般无地震发生,有时可伴有小震。

近年来,一些研究者注意到了粘滑断层在大震前后一段时间内在震源和震源外围的蠕滑问题。例如,1976年唐山地震震中区地形变资料反演求得,在1969~1975年间曾发生了走滑错距为104cm的无震蠕滑,走向和倾向滑动的平均速率分别达18.6cm/a和1.4cm/a。此外,有的地震刚发生时,地表上见不到断层位移,经过数日或一年后,地表才出现这次地震产生的位移。这种断层后效蠕动位移现象,说明了地震时基岩中发生的断层位移,在其上覆盖层中是以塑性流动的形式而滞后到达地表面的。

三、活动断裂的定量研究

表征活动断裂在时空域内运动的参数有:活动断裂的产状、长度、断距、错动速率和重复周期、年龄判断等。它们是活动断裂区进行地震预报和设防的重要资料。

(一) 活动断裂的产状

活动断裂的产状,包括断层面的走向、倾向和倾角,可通过遥感影像判读、宏观地质调查、震源机制断层面解,以及对等震线几何特征、地表地震断层和裂缝带、大地测量资料的分析等多种途径获取。

(二) 活动断裂的长度和断距

研究者习惯上将地震时地表断裂带长度和断层最大位移值来分别表征活动断裂的长度和断距。一般地说,地震的震级愈大,震源深度愈浅,地表断裂愈长,断层位移量也愈大。实测资料表明,一般大于7.5级的浅源地震均伴有地表错断,而小于5.5级者则少见。地震时地表错断的长度可从小于1公里至数百公里,地表错移量从几厘米至十来米。它们的变化均很大。

一般认为,地面上产生的最长地震断裂最能代表震源断层的长度。据此观点,我国地震工作者统计了我国及邻近地区地震的地表断裂资料,于1965年提出了如下关系式:

$$M=3.3+2.1\lg L \quad (8-25)$$

式中: M——为地震震级;

L——为相应的最长地面断裂长度(以km计)。当某次地震已知其震级时,即可按上式估算震源断层的长度。

(三) 活动断裂的错动速率和周期

活动断裂的错动速率,一般是通过重复精密地形测量和研究第四纪沉积

物年代及其错位量而获得的。重复精密地形测量可以精确地测定活动断裂不同地段的现今错动速率。而第四纪沉积物年代及其错位量的研究则只能确定活动断裂在最新地质时期内的平均错动速率。

据统计，我国活动断裂的平均错动速率各地差异甚大。

地震断层两次突然错动之间的时间间隔，即是活动断裂的错动周期。

活动断裂发生大地震的重复周期往往长达数百年至数千年，有的已超出地震记录的时间。为此，要加强史前古地震的研究，利用古地震保存在近代沉积物中的地质证据及地貌记录，来判断层错动的次数和年代。

地震断层的错动周期主要取决于断层周围地壳应变速率和断层面锁固段(活断层的端点、拐点、交汇点、分支点和错裂点，它们被称为活动断裂锁固段)的强度。一般情况是：应变速率愈小，锁固段强度愈大则错动周期愈长。这即是说，地震强度愈大的活动断裂。其错动周期愈长。因此。刚发生过大地震的地段应该是安全的。

(四) 活动断裂的年龄判据

确定活动断裂最新一次活动的地质年代和绝对年龄，对工程建设至关重要。

活动断裂的年龄判据，要以第四纪地质学和地层学研究等为基础，来判定活动断裂的地质年代或年代范围。在此基础上。应用现代测试技术，取样测定绝对年龄。所以，年龄判据方法可分为错断地层年龄法(间接法)和断层物质绝对年龄法(直接法)两大类。

错断地层年龄法适用于错断断层带及其所在地质体上覆盖第四纪沉积物的条件下。断层物质绝对年龄测定法，是从断层带内采取样品，并用专门仪器测定样品中某些矿物、岩石、化石的物理、化学和显微结构的变化等。用以确定绝对年龄。目前，有效的方法有： C^{14} 法、热发光法、铀系法、电子自旋共振法和石英表面显微结构法等。这些方法精度高，结果可靠。但取样有特殊要求。

若将上述两种方法结合起来使用，活动断裂年龄判据的可信度是很高的。

四、活动断裂的鉴别

活动断裂的鉴别是对其进行工程地质评价的基础。由于活动断裂是第四纪以来构造运动的反映，它便显示出新的构造活动形迹。所以，我们可以借助地质学、地貌学、地震地质学以及现代测试技术等方法 and 手段，定性和定量地鉴别它。

(一) 地质、地貌和水文地质特征

1. 地质特征

最新沉积物的地层错开，是活动断裂最可靠的地质特征。一般地说，只要见到第四纪中、晚期的沉积物被错断，无论是老断层的复活或新断层的出现，均可鉴别为活动断裂。鉴别时需注意与地表滑坡产生的地层错断相区别。

一般活动断裂的破碎带由松散的破碎物质所组成，而老断层的破碎带均有不同程度的胶结。所以松散、未胶结的断层破碎带，也可作为判别活动断裂的地质特征。

2. 地貌特征

由于活动断裂的构造地貌格局清晰，所以许多方面可作为其鉴别特征。

它们也是断层错动在地层中或地表面留下来的证据。保留在最新地层中的地层错开是断层活动的长期记录，是最可靠的证据。当然必须与地表滑坡产生的地层错动相区别。地表变形产生的证据为地貌证据，主要地貌证据有：

(1) 断崖：如果在松散沉积中容易被侵蚀所破坏，在基岩中则多被侵蚀成三角面。活动断裂往往构成两种截然不同的地貌单元的分界线，并加强各地貌单元之间的差异性。典型的情况是：一侧为断陷区。堆积了很厚的第四纪沉积物；而另一侧为隆起区，高耸的山地，叠次出现的断层崖、三角面、断层陡坎等呈线性分布。两者界线截然分明。

(2) 溪流错开：相邻溪流沿同一条线作方向相同的肘状转折。走滑型活动断裂可使穿过它的河流、沟谷方向发生明显变化；当一系列的河谷向一个方向同步移错时，即可作为鉴别活动断裂位置和性质的有力佐证。根据水系移错的距离和堆积物的绝对年龄，还可推算该活动断裂的平均错动速率。

(3) 封闭洼陷或下陷池塘。应与岩溶塌陷形成的下陷池塘相区别。通常活动的走向错动或正断层往往有下陷池塘。

(4) 冲积层中的活动断裂带经常构成地下水的障壁，这是活动断裂的特有现象。往往沿活动断裂出露一系列泉或断层两侧地下水位高程不同，致使地面的色调或植被不同，所以也就成为判定活动断裂的有力标志之一。

(5) 滑坡分布线，由于活动断裂错动形成的陡崖常发育一系列滑坡。

(6) 错开的阶地或错开的冲积扇。

(7) 活动断裂经常造成同一地貌单位或地貌系统的分解和异常。如同一夷平面或阶地被活动断裂错断，造成高差和位错。

此外，在活断裂带上滑坡、崩塌和泥石流等动力地质现象常呈线性密集分布。

3. 水文地质特征

活动断裂带的透水性和导水性较强，因此当地形、地貌条件合适时，沿断裂带泉水常呈线状分布，且植被发育。此外。许多活动断裂沿线常有温泉出露。它们均可作为活动断裂的判别标志。

但需注意的是，有些老断层沿线泉水也有线状分布的特征，判别时要慎重，应结合其他特征与之区别。

地质、地貌和水文地质特征地表迹象明显的活动断裂。在遥感图像中的信息极为丰富，即使是隐伏的活动断裂，也可提供一定的信息量。因此，利用遥感图像判释来鉴别活动断裂，是一种很有效的手段。尤其是研究大区域内的活动断裂，利用遥感图像判释更有明显的优越性。

(二) 历史地震和历史地表错断资料

包括：历史上记录的地震的证据和说明，历史上记录的地表错断的证据和说明，以及断层错动的大地测量记录等三类标志。

我国历史悠久，典籍丰富，所以前两类标志是十分丰富的。历史上有关地震和地表错断的记录，也是鉴别活动断裂的证据。一般地说，老的历史记载，往往没有确切的震中位置，又无地表错断的描述，所以只能用以证实有活动断裂存在，而难以确切判定活动断裂的位置。而较新的历史记载，震中位置、地震强度以及断裂方向、长度与地表错距等，都较为具体、详细。因此，对历史记载要加以分析。

(三) 使用仪器测定

利用密集的地震台网能确切地测定小震震中位置，并确定活断层的存在。但是，有些活动性较强的蠕滑断层，并不发生地震。所以单纯依靠它来鉴别活动断裂，就不会获得满意的效果。采用重复精密水准测量和三角测量所获得的地形变的证据，能判定无震蠕滑断层或地震断层的活动性。它可求算活动断裂不同地段两盘相对活动的趋势和幅度。

大地测量所取得的地形变资料是断层活动的第三类历史证据，这种证据通常能表明断层活动是无震的错动，亦即断层蠕动或是伴有地震的迅速错动。大地测量资料还可以表明应变的积累情况。

（四）地震标志

经地震台网仪器记录确定大地震震中沿一定断层线分布，则表明此断层曾经错动并发震，将来也会错动和发震。近年来很多人主张以密集的地震台网确切测定小地震震中位置，以它们沿一定断层线分布作为判定活动断裂的一种地震标志。但这种活动断裂是否会产生大地震或地表错动，单凭这种标志还不能确定。美国沿加州圣安德烈斯断层所进行的微震监测是这类研究的前驱。我国进行此项工作较迟，尚未取得足够资料。

地震标志与其它标志相比是记录时间最短的，例如美国自 1932 年以来才有仪器记录，我国的仪器记录主要是解放以后才逐步建立起来的。

五、活动断裂的勘察要点

抗震设防烈度等于或大于 7 度的重大工程场地应进行活动断裂(以下简称断裂)勘察。断裂勘察应查明断裂的位置和类型，分析其活动性和地震效应，评价断裂对工程建设可能产生的影响，并提出处理方案。

1.断裂勘察之前，应搜集和分析有关文献档案资料，包括卫星航空相片，区域构造地质，强震震中分布，地应力和地形变，历史和近期地震等。

2.断裂勘察工程地质测绘，除应符合一般工程地质勘察的要求之外，尚应包括下列内容的调查：

(1)地形地貌特征：山区或高原不断上升剥蚀或有长距离的平滑分界线；非岩性影响的陡坡、峭壁、深切的直线形河谷，一系列滑坡、崩塌和山前叠置的洪积扇；定向断续线形分布的残丘、洼地、沼泽、芦苇地、盐碱地、湖泊、跌水、泉、温泉等；水系定向展布或同向扭曲错动等。

(2)地质特征：近期断裂活动留下的第四系错动，地下水和植被的特征；断层带的破碎和胶结特征等；深色物质宜采用放射性碳 ^{14}C 法，非深色物质宜采用热释光法或铀系法，测定已错断层位和未错断层位的地质年龄，并确定断裂活动的最新时限。

(3)地震特征：与地震有关的断层、地裂缝、崩塌、滑坡、地震湖、河流改道和砂土液化等。

3.大型工业建设场地，在可行性研究勘察时，应建议避让全新活动断裂和发震断裂。避让距离应根据断裂的等级、规模、性质、覆盖层厚度、地震烈度等因素，按有关标准综合确定。非全新活动断裂可不采取避让措施，但当浅埋且破碎带发育时，可按不均匀地基处理。