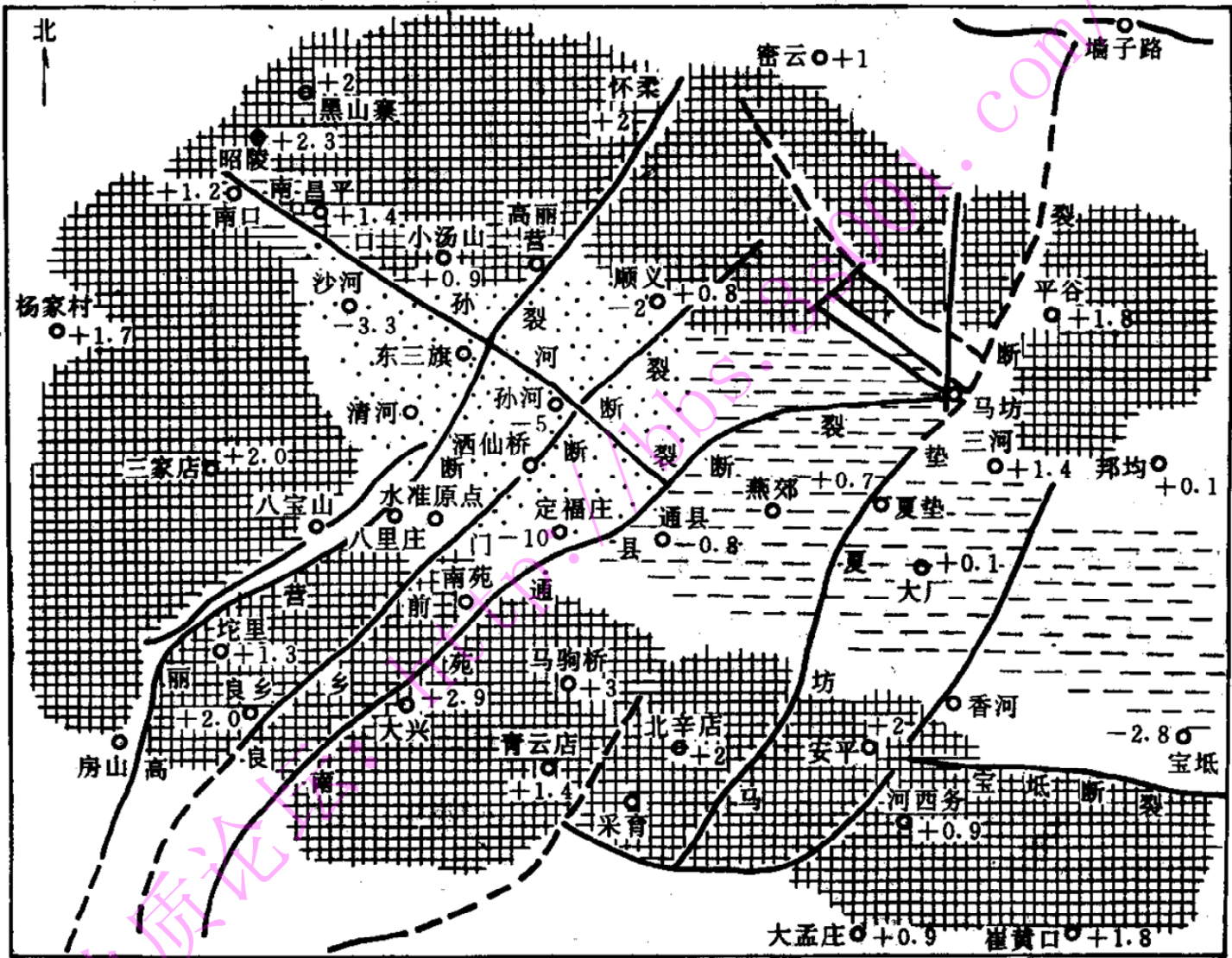


## 第二章 活断层工程地质研究

活断层和地震是两种密切相关的工程动力地质作用，是区域性的，对工程建筑物的影响范围较大，往往是突然发生，酿成严重灾害。

并且世界上90%以上的地震是由于断层活动而引起的。

地球的构造运动可使地壳和上地幔中积聚构造应力，当构造应力增大并超过介质强度时，往往表现为活断层的突然错动，释放应变能，并以弹性波的形式在地壳表层传播而发生地震。

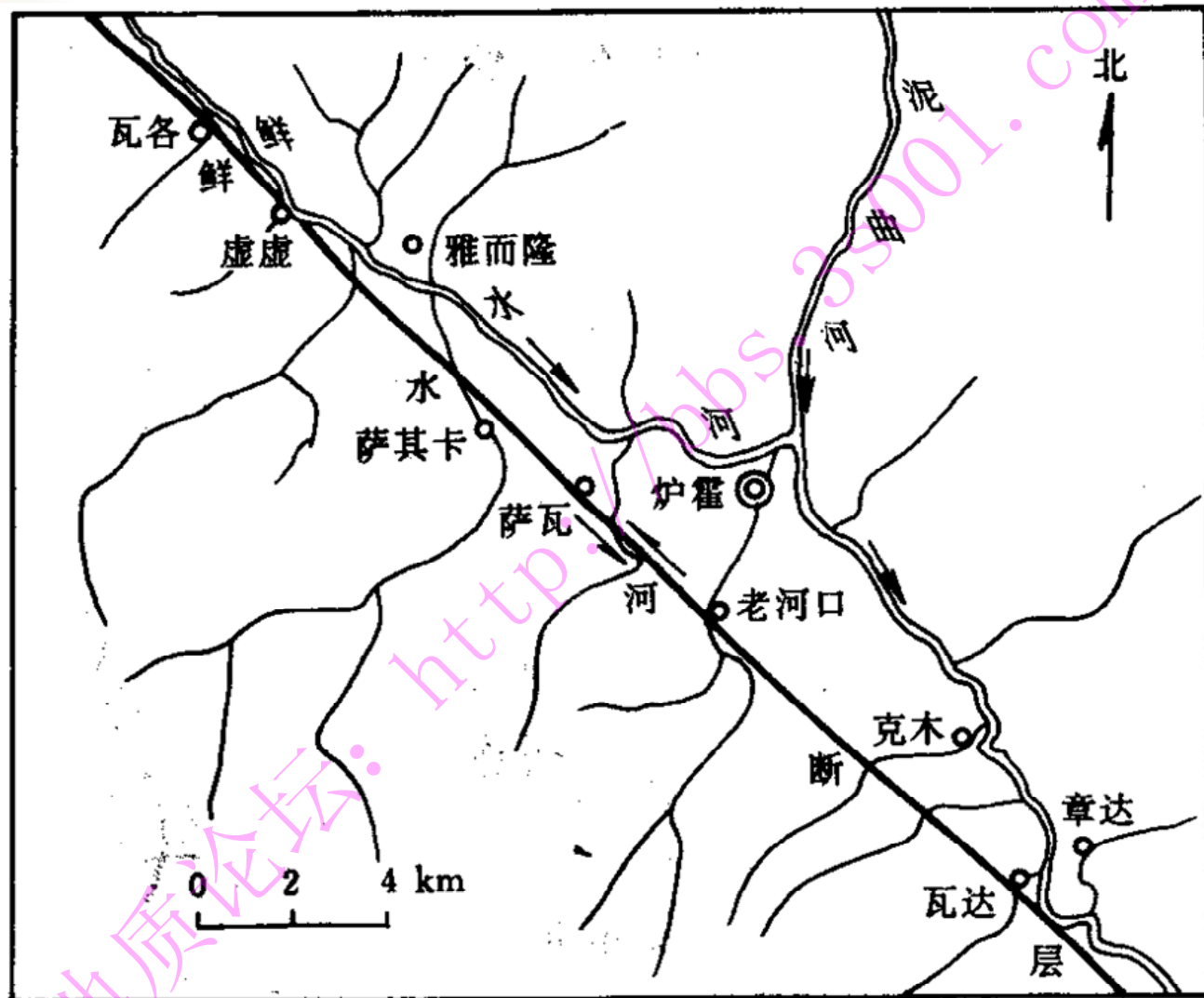


北京平原断裂系统及现代垂直运动图

“+”为上升；“-”为下降，单位  $\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。三河、平谷、马坊一带，

若干断层在此交叉，1979年9月2日发生马坊大地震

据黄培华等《地震地质学基础》



四川省炉霍鲜水河断层  
1973年2月6日发生炉霍大地震  
国家地震局西南烈度队，1977

## 一、断层的定义

- ❖ 岩层受构造应力作用发生断裂，沿断裂面两侧岩层发生了移动或明显错位的断裂构造被称为断层。该断裂面称作断层面，其中位于断层面之上的岩体断块被称为断层的上盘，位于断层面以下的断块被称为断层的下盘。



## 二、活断层的定义

活断层或称活动断裂是现今仍在活动或者近期（晚更新世以来，约12万年）有过活动，不久的将来还可能活动的断层。其中后一种也叫潜在活断层。活断层可使岩层产生错动位移或发生地震，对工程建筑造成很大的甚至无法抗拒的危害。

- ❖ 断层在目前持续活动的标志，当然是判定活断层的无可争议的证据。如何判定潜在活断层则有各种不同的标准。人类历史时期有过活动记录的当然是潜在活断层。对近期地质历史时期却有不同的理解与限定。

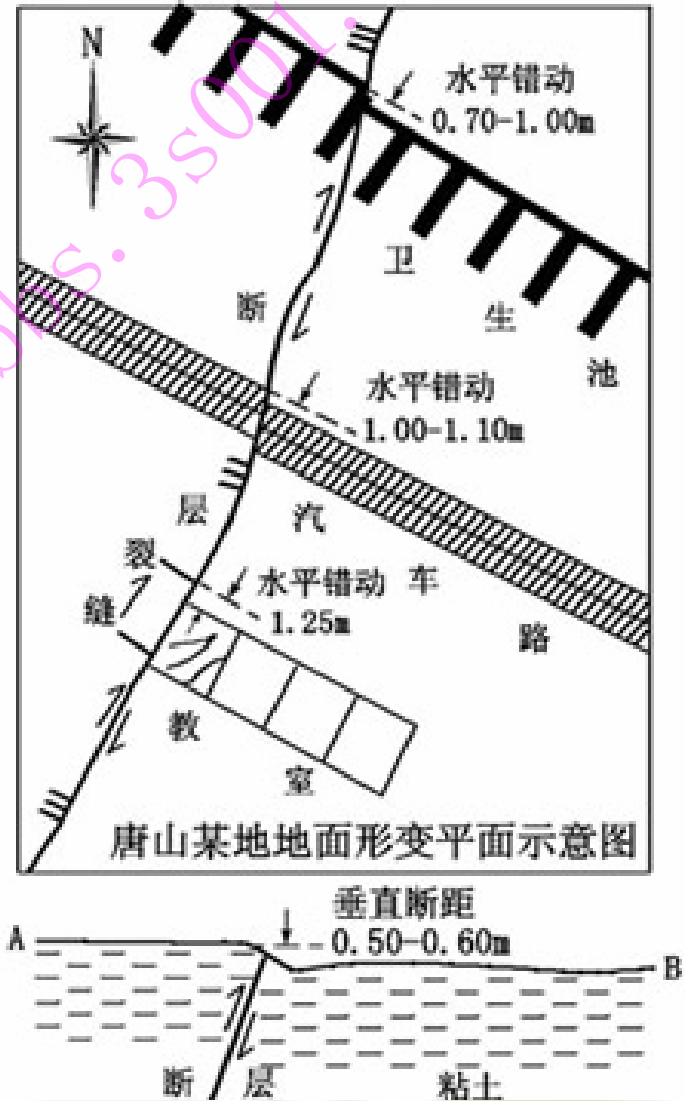
- ❖ 有人将之限于全新世(即最近11000a以内), 有人则限于最近35000a (以 $^{14}\text{C}$ 确定绝对年龄的可靠上限)之内, 更有人限于晚更新世(最近100,000 a 或500,000a)之内, 或者根据近期地质历史时期(例如第四纪期间)有重复活动来判定。
- ❖ 从工程使用时间尺度和断层活动时间测年的准确性来考虑, 活动时间上限不宜太长, 应以前两者为适当。可能有重新活动的不远的将来, 一般理解为重要建筑物如大坝、原子能电站等的使用年限之内, 约为100a-200a。

对活断层进行工程地质研究的重要意义有以下两个方面：

- ❖ 其一是断层的地面错动及其附近的伴生的地面变形，往往会直接损害跨断层修建或建于其邻近的建筑物。
- ❖ 其次是活断层多伴有地震，而强烈地震又会使建于活断层附近的较大范围内的建筑物受到损害。

❖ 活断层错动直接损害建筑物的例子迄今为止为数不多。

在我国则有1976年唐山地震时的长达8km的地表错断。它呈北30°东方向由市区通过，最大水平错距3m，垂直断距0.7-1.0m，错开了道路、围墙、房屋、水泥地面等一切地面建筑物。





- ❖ 宁夏石咀山红果子沟一带的活断层，也将明代(约400a前)长城边墙水平错开1.45m(右旋)，且西升东降垂直断距约0.9m。
- ❖ 日本神户附近的六甲地区活断层对建筑物的影响也是一个较好例子。津田调查了六甲山南侧平原和阶地上建筑物出现裂缝的情况，并以统计法编制了受损害建筑物等密线图。图上的高密度延伸线恰好与六甲山麓发育的几条活断层的延长线一致，表明建筑物的损坏与断层活动有关。

图4-2 日本神户附近建筑物破裂密度与活断层关系图  
(据津田景三, 1972)



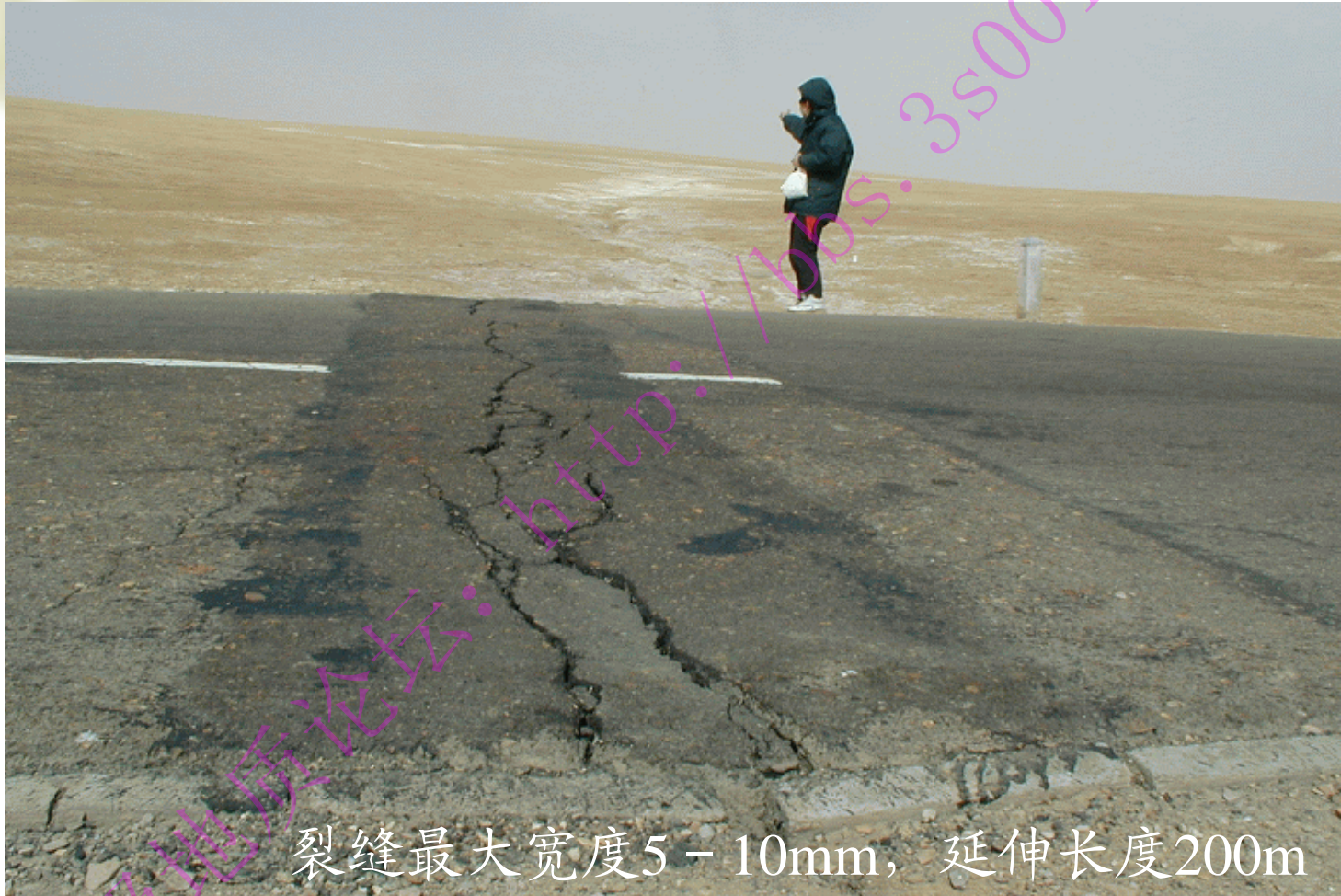
## 地表断裂

1995年日本阪神大地震，与地震同时产生的断层。

本図は、地震が起きた直後の、東区深江地区の自衛隊の駐車基地。25日、東区深江地区。



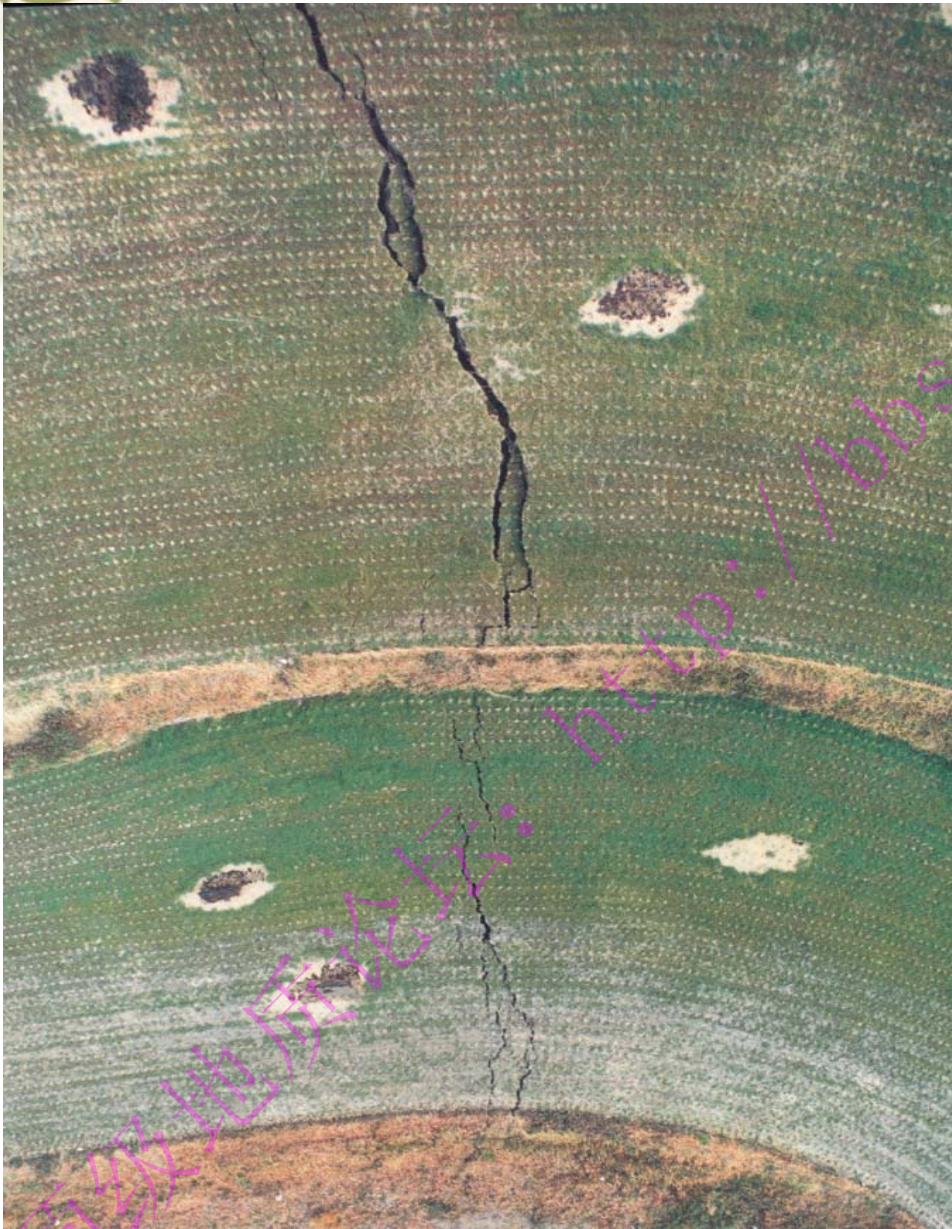
# 地表断裂



裂缝最大宽度5-10mm，延伸长度200m

风火山隧道北部断裂切割表层第四系和公路





## 地表断裂

1995年日本  
阪神大地  
震，农田中  
的裂缝清晰  
可见

# 地表断裂



1995年日本阪神大地震，断层错移使道路变形。



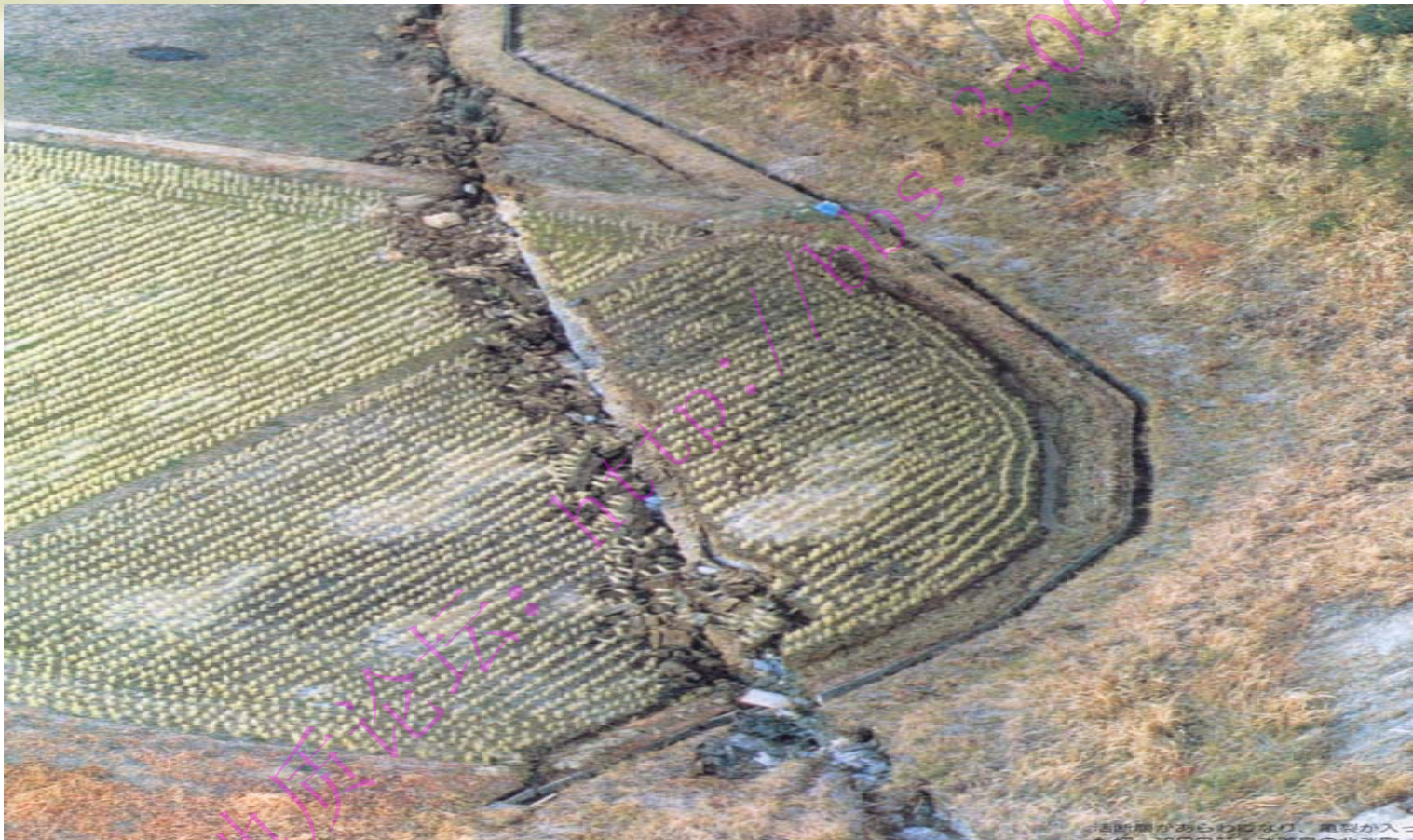
# 地表断裂



1995年日本阪神大地震，地表错断现象，围墙错裂。



# 地表断裂



1995年日本阪神大地震，地表错断现象。



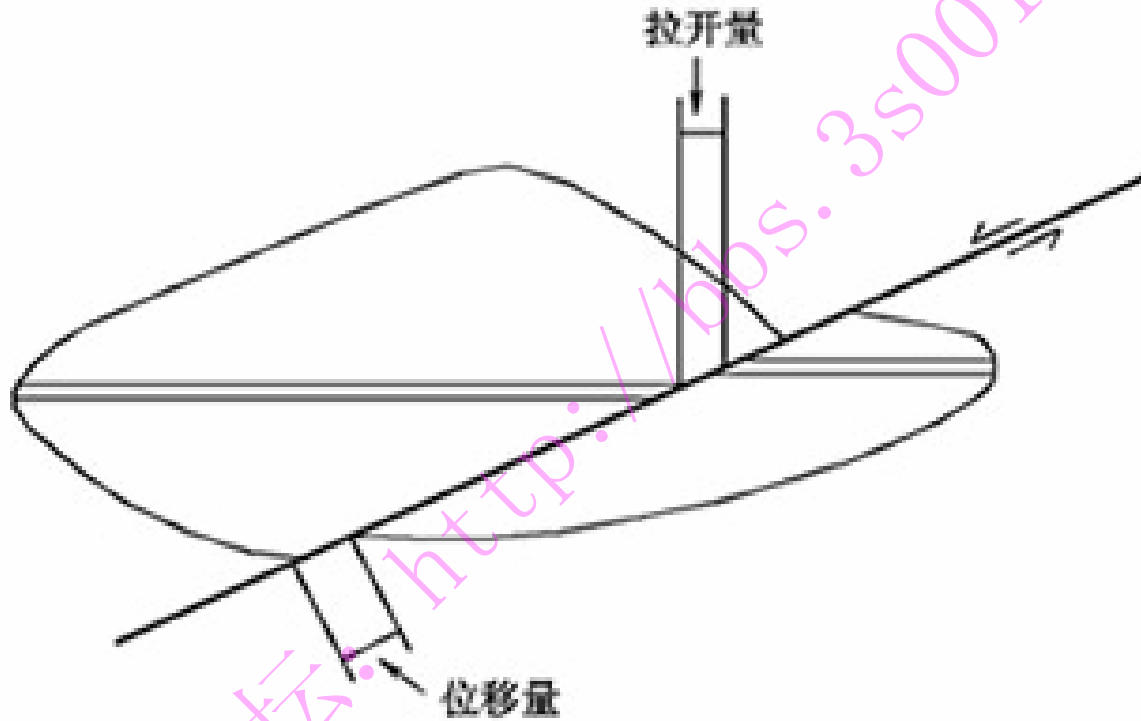
### 三、活断层的分类

#### (一) 按两盘相对错动方向分类

活断层按两盘错动方向分为走向滑动型断层（平移断层）和倾向滑动型断层（逆断层及正断层）。

1. 走向滑动型断层最常见，其特点是断层面陡倾或直立，平直延伸，部分规模很大，断层中常蓄积有较高的能量，引发高震级强烈地震。

河流最易于沿这种断层发育，水工建筑物也最易于受到这种活断层的威胁。



走向滑动活断层引起的心墙拉开

## 美国圣安德列斯大断裂



顶级地质论坛: <http://bbs.3s001.com/>

2. 倾向滑动型断层以**逆断层**更为常见，多数是受水平挤压形成，断层倾角较缓，错动时由于上盘为主动盘，故上盘地表变形开裂较严重，岩体较下盘破碎，对建筑物危害较大。倾向滑动型的**正断层**的上盘也为主动盘，故上盘岩体也较破碎。

在我国逆断层主要发育于西部地区。受印度板块年速率约6cm的NNE向俯冲的推挤，自南而北有喜马拉雅山南麓逆冲推覆断层，天山南侧，天山北侧逆冲推覆断层等几个长达数百公里走向近东西的逆断层，青藏断块东界的北段，则有走向北东的龙门山逆掩推覆断层；所有这些断层都是活动性强烈的发震断层。



## (二) 按活动性质分类

活断层按其活动性质分为蠕变型活断层(蠕滑型)和突发型活断层(粘滑型)。

1. 蠕变型活断层是指活断层只有长期缓慢的相对位移变形, 不发生地震或只有少数微弱地震。如美国圣安德烈斯断层南部加利福尼亚地段, 几十年来平均位移速率达10mm/a, 却没有较强的地震活动。
2. 突发型活断层错动位移是突然发生的, 并同时伴发较强烈的地震。又分为两种情况, 一种是断层错动引发地震的发震断层, 另一种情况是因地震引起老断层错动或产生新的断层。

### (三) 按定义分类

- 《岩土工程勘察规范》(GB50021-2001)规定：抗震设防烈度大于或等于7度的重大工程应进行活动断裂勘察。这里所指的**重大工程场地**包括大型工业建设场地或者《建筑设计规范》(GB50011-2001)规定的甲类、乙类及部分重要的丙类建筑。并规定：
  - **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，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**；
  - **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。

断 裂 分 级		活动性	平均活动速率 (mm/a)	历史地震震级 (M)
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	>1	M>6
II	中等全新活动断裂	中或晚更新世以来有活动，全新世活动较强烈	1~0.1	$6 \geq M \geq 5$
III	微弱全新活动断裂	全新世有微弱活动	$\leq 0.1$	M<5

《岩土工程勘察规范》(GB50021-2001)之规定

## 四、活断层的基本特征

### (一) 活断层是深大断裂复活运动的产物

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。

### (二) 活断层的继承性和反复性

活断层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。



### (三) 活断层的活动方式

活断层的活动方式基本有两种：

(1) 一种是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) 另一种是沿断层的高异常带内，断裂锁固能力弱，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。

**注意：一条活断层的不同段上，可能反应不同的活动方式。**

?

围岩强度差异

## 五、活断层的判别标志（1.直接标志）

- (1) 错断晚更新世(13万a)以来地层的断层。
- (2) 断裂带中的构造岩或被错动的脉体，经绝对年龄测定，最后一次错动年代距今10~15万a。
- (3) 根据仪器观测，沿断层有大于0.1mm / a位移。
- (4) 沿断层有历史和现代中、强震震中分布，或有晚更新世以来的古地震遗迹，或有密集而频繁的近期微震活动。
- (5) 在地质构造上，证实与已知活断层有共生或同生关系的断层。

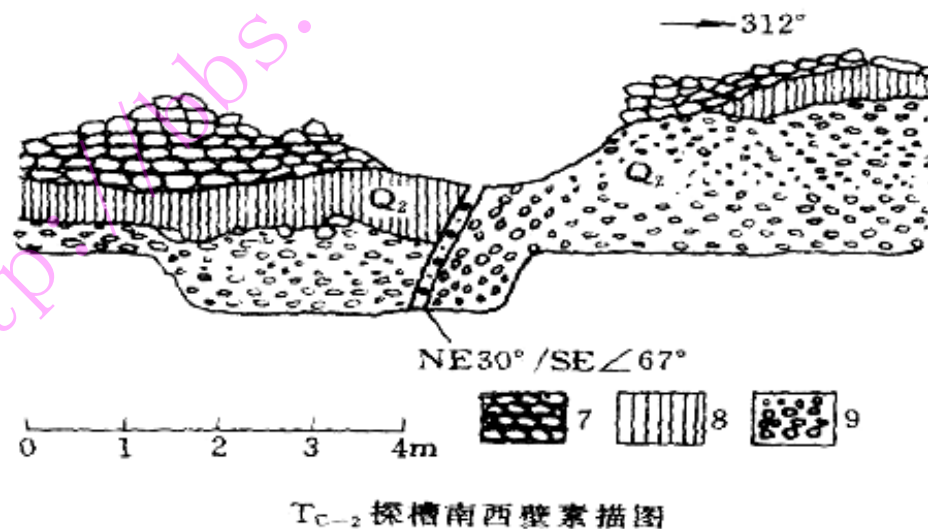
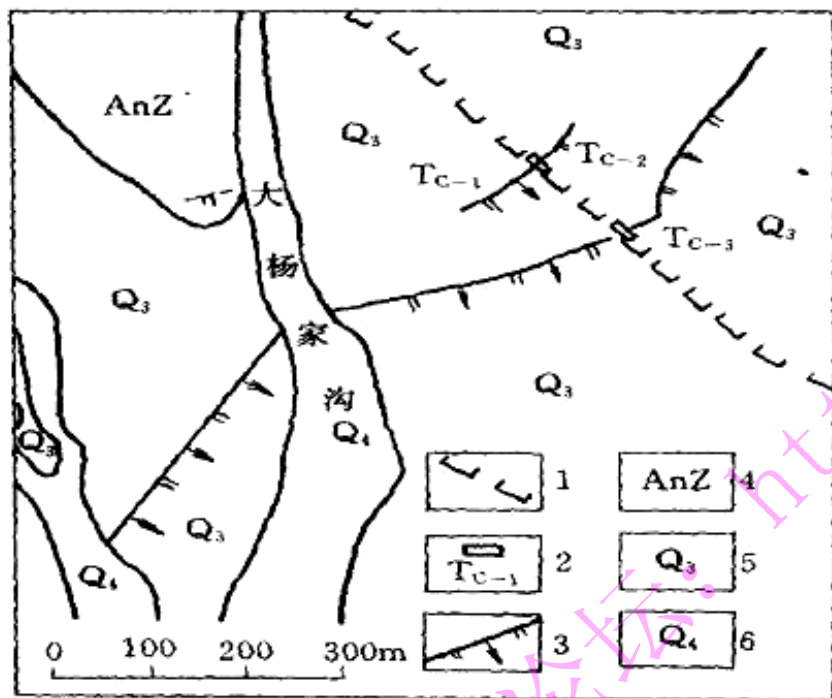
## 活断层的判别标志 (2.间接标志)

具有下列标志之一的断层，可能为活断层，应结合其它有关资料，综合分析判定。

- (1) 沿断层晚更新世以来同级阶地发生错位；在跨越断层处，水系有明显的同步转折现象，或断层两侧晚更新世以来的沉积物厚度有明显的差异。
- (2) 沿断层有断层陡坎，断层三角面平直新鲜，山前经常分布有连续的大规模的崩塌或滑坡，沿断层有串珠状或呈线状分布的斜列式盆地、沼泽、冷泉和承压泉等。
- (3) 沿断层有明显的重力失衡带分布。
- (4) 沿断层有水化学异常带或同位素异常带分布。



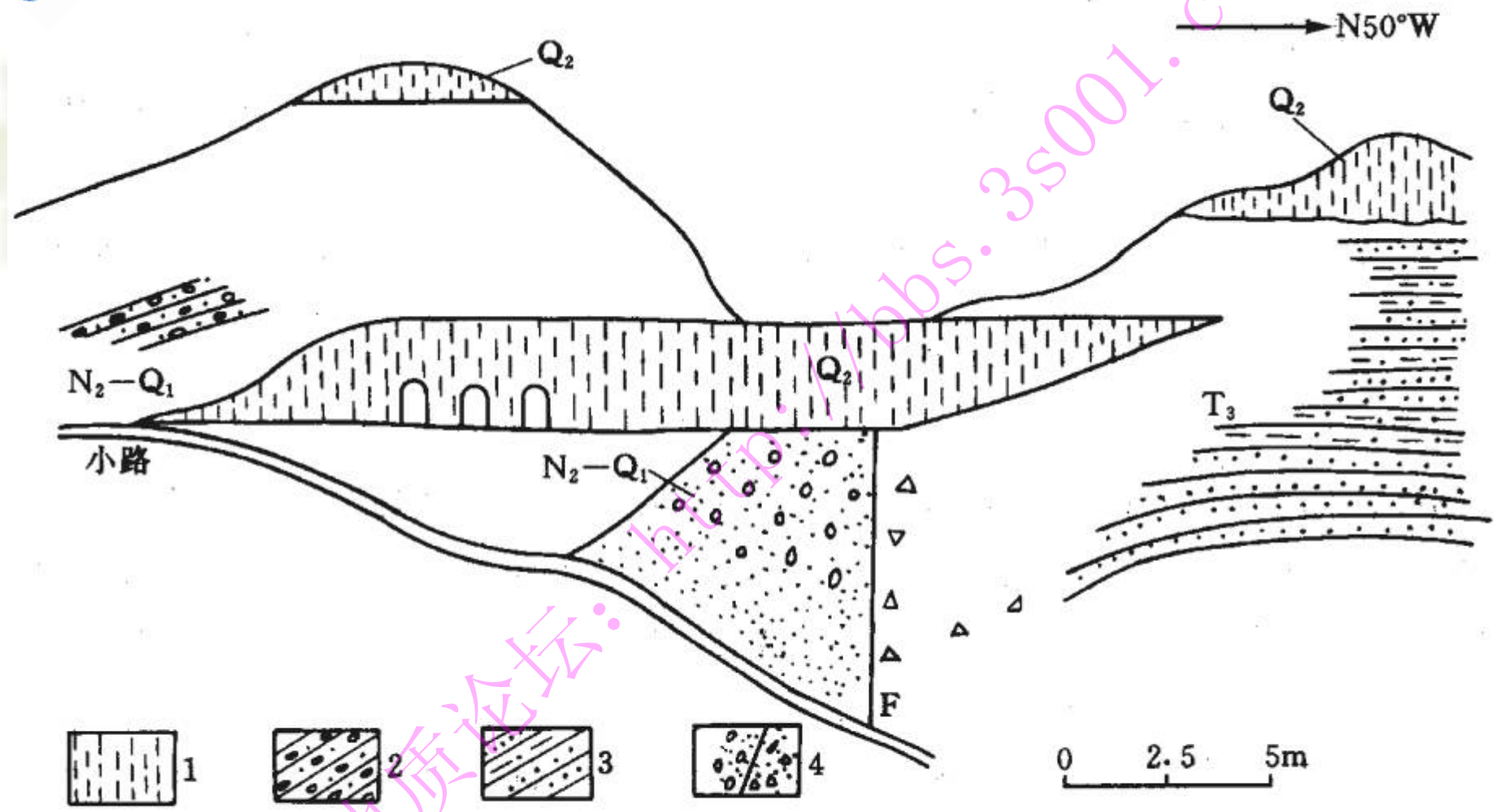
## 宁夏一活断层剖面



宁夏红果子沟长城错断处地质图及探槽剖面图 (据廖玉华)

- 1—长城；2—探槽；3—断层；4—前震旦系；5—晚更新统；6—全新统；  
7—长城墙基；8—砂质粘土 (Q<sub>2</sub>)；9—砾石层 (Q<sub>2</sub>)

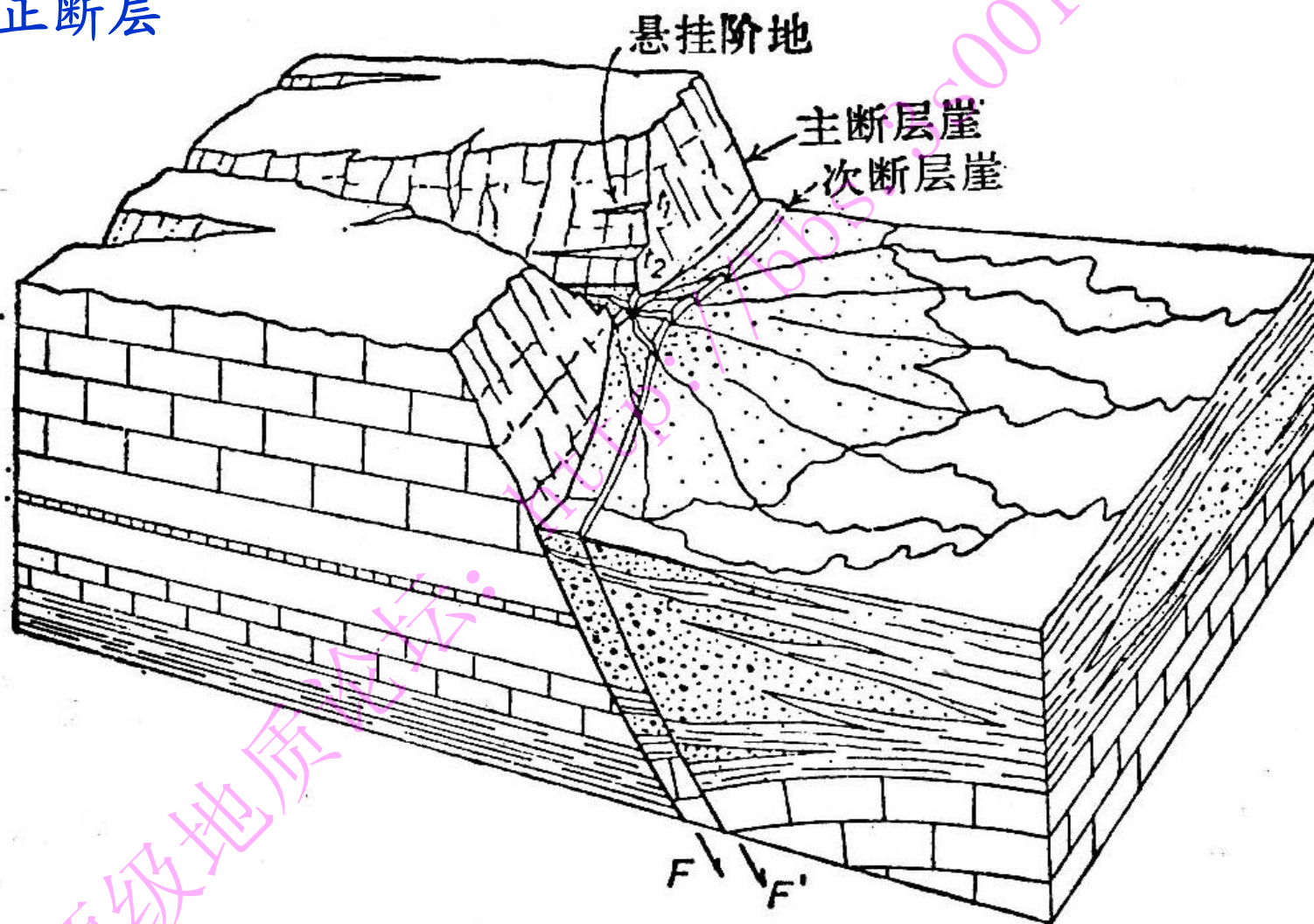
# 小浪底附近一活断层剖面



孟津县秦家门王良断层素描剖面图

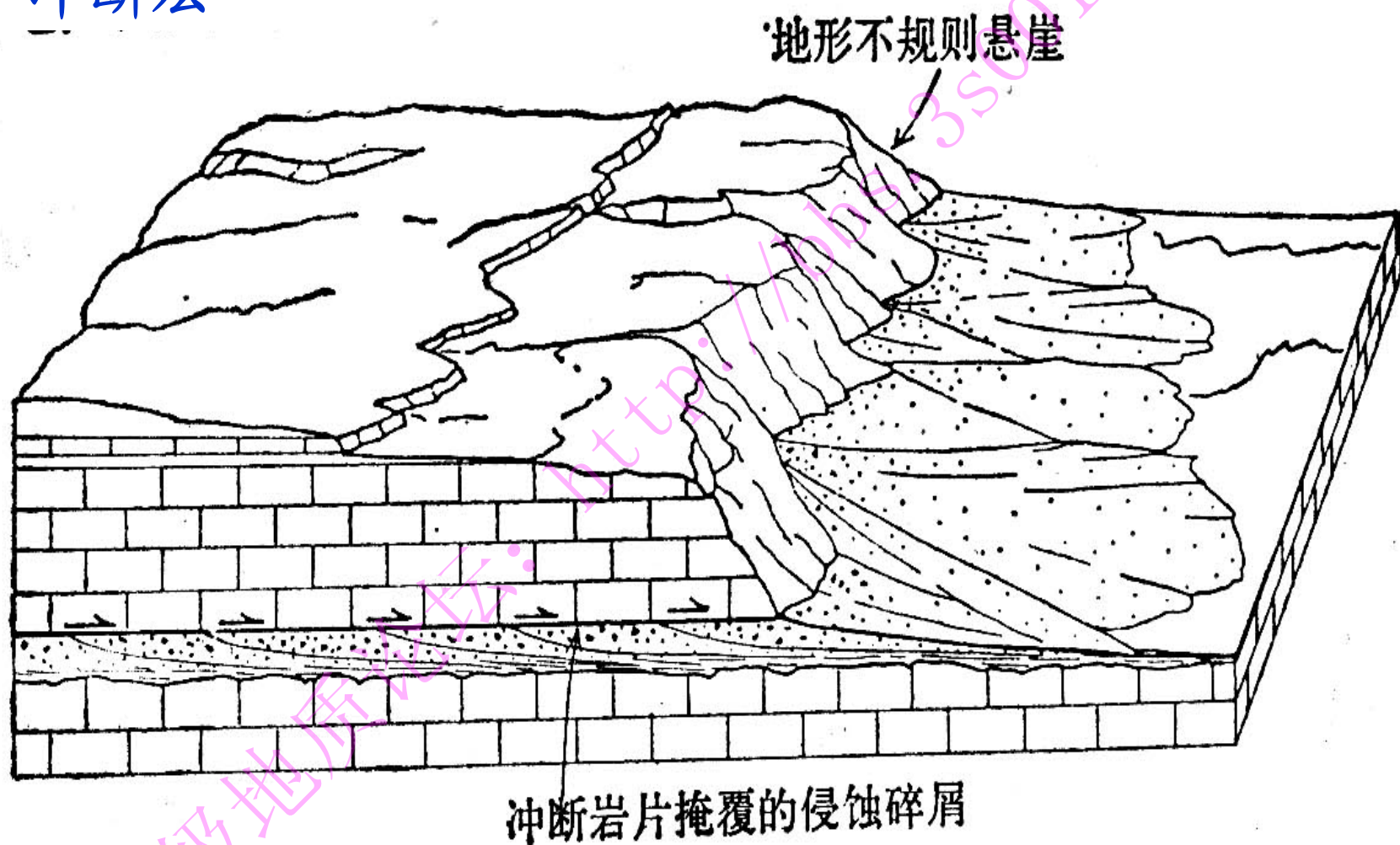
1—黄土；2—砾岩；3—砂岩、粉砂岩；4—断层破碎带

## 正断层





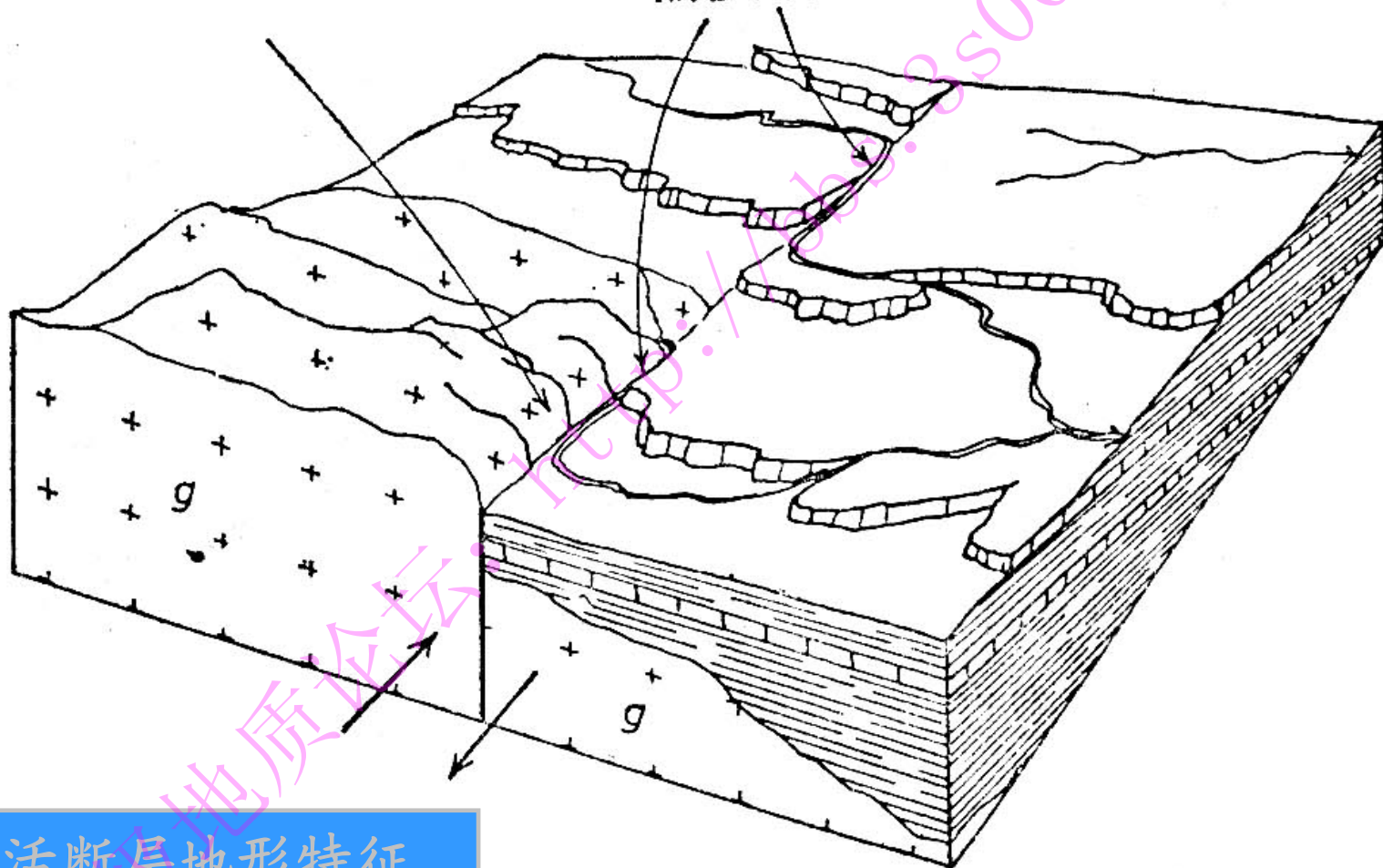
## 冲断层



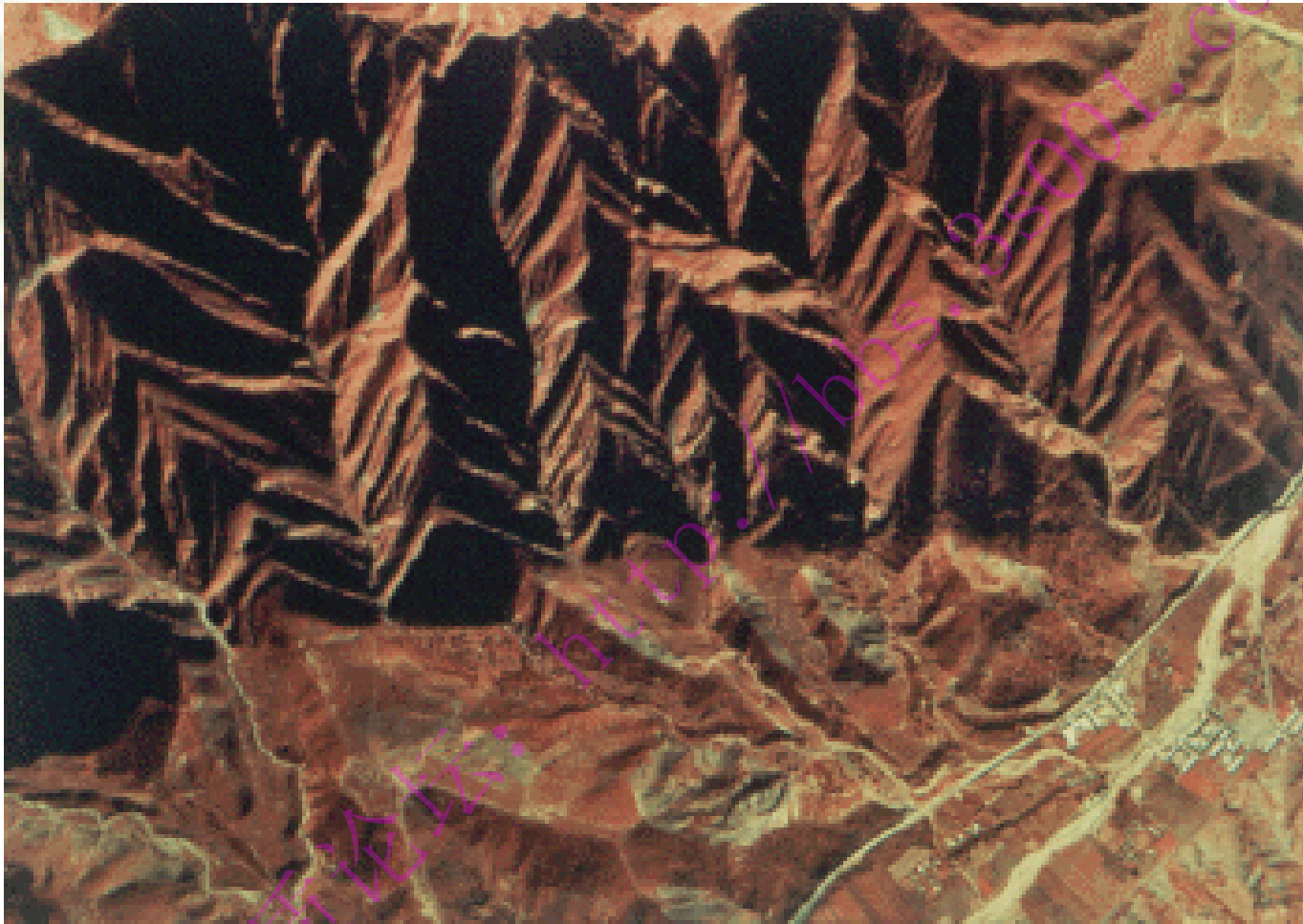
局部地形悬崖

偏移的河道

走滑断层



活断层地形特征



断层三角面



## 六、活断层参数的定量研究

活断层在时空域内运动的参数有：活断层的产状、长度、断距、错动速率、错动周期和活动年龄等。这些参数是在活断层区进行地震预报和设防的重要资料。对它们的了解和分析有助于把握活动断裂的活动规律性，也是评价建设场地区域地壳稳定性的重要依据。

- (一) 活断层的产状
- (二) 活断层的长度和断距
- (三) 活断层的错动速率和错动周期
- (四) 活断层的年龄判据

## (一) 活断层的产状

活断层的产状，**包括**断层面的走向、倾向和倾角，可**通过**遥感、地质调查、震源机制断层面解，以及对等震线几何特征、地表地震断层裂缝带、大地测量资料的分析等多种途径获取。

## (二) 活断层的长度和断距

地震时地表断裂带长度和断层最大位移值分别表征活断层的长度和断距。

一般地说，地震的震级愈大，震源深度愈浅，则地表断裂愈长。断层位移量也愈大。

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。



### (三) 活断层的错动速率和错动周期

活断层的错动速率，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断层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，则只能确定活断层在最新地质时期内的平均错动速率。

**错动周期：**地震断层两次突然错动之间的时间间隔。即是活断层的错动周期。

活断层发生大地震的重复周期往往长达数百年至数千年。

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。即地震强度愈大的活断层，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) 活断层的年龄判据

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。

(1) **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。

(2) **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： $^{14}\text{C}$ 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，活断层年龄判据的可信度是很高的。



## 七、活动断裂最危险地段

活动断裂系统具有分段活动特征，断裂作用的方式表现为孕震、减震、隔震和无震滑动等。强烈地震往往发生在活动深断带的特殊部位：

①两条或多条第四纪以来活动断裂交汇，或交而不汇区以及活动断裂曲折、弯曲最突出的部位；②第四纪以来活动断陷盆地内断距较大的一侧；③活动深断裂围陷时的三角形、四边形等构造闭锁段；④活动断裂带的两头常是震中往返跳动的地方，在端部应力集中并进一步推动它继续被延伸的地点；⑤活动断裂带上具有强活动速率地段或跨断裂带地形变测量的显著形变梯度带；⑥活动断裂带有多次强震重复发生或活动断裂带缺震区。

## 八、断层的工程地质评价

- ❖ (1) 大多数情况下，断层面两侧一定宽度范围内的岩石破碎，对场地的稳定性影响极大；
- ❖ (2) 在新构造运动强烈的地区，有的断层可能有活动性，甚至有产生地震的可能性，这将对其附近的工程带来极大的事故隐患；
- ❖ (3) 断层与地下水常紧密相连，给地下工程造成事故隐患（河南平顶山二矿某井下巷道施工中遭遇的断层透水事故）；
- ❖ (4) 断层是软弱结构面；
- ❖ (5) 断层上、下盘岩石的性质一般不同，跨越其间的建筑物可能因不均匀沉降而产生破坏；
- ❖ (6) 断层的存在对采矿工程会往往会造成极大困难，尤其是机械化程度较高的矿山，因地质构造的存在造成的工作面搬迁既浪费时间、影响正常生产，又造成许多安全隐患。
- ❖ 因此，在选择建筑物场地时，最好避开断层地带。采矿生产也应加强对断层影响的考虑。

## 九、活动断裂的工程效应及防治

1. 活动断裂的工程效应主要有：地震振动波直接破坏建筑物；地震断层的错位剪切破坏建筑物；强震动影响下使部分场地或地基失效而破坏建筑物，如强震引起的山崩、滑坡、饱和土液化等。
2. 工程效应不同工程措施也有区别：
  - (1) 对于地震的破坏，是大范围的，主要是采取就地按烈度抗震设防加固的措施，当然对在高烈度区的新建工程也可以易地另选场址。
  - (2) 地震断层的错位影响主要局限在断裂带或其两侧一定的范围内，沿其走向方向狭长的条带状，范围是有限的，完全可以采取避开建设的措施，根据建筑物重要性不同，避开的距离可采用不同的建筑安全距离。



## 十、断层区的建筑原则

活断层不论是持续地缓慢蠕动，还是周期性突然错动，对附近的工程建筑物造成直接或间接损害。所以，在活断层区进行工程建设时，对建筑物场址选择、建筑物类型和结构设计等方面，须慎重考虑，保证安全可靠和正常使用。

## 1、场址选择上

(1) 一般应避开活动断裂带，尤其是高坝、核电站这类重要的永久性建筑。

(2) 由于国民经济建设需要，为了开发各种资源不得不在活断层发育地区进行工程建设时，就必须对活断层进行活动性分析评价，选择不受活断层影响或相对影响小的地方作为场址。如：倾滑断层（正断层、逆断层）发育区，尽量把场址选在下盘。还应距主滑面一定距离之外的地区。因为上盘大多为主动盘，有强烈地表变形、分布断层多。

(3) 铁路、桥梁、运河等线性工程必须跨越活断层时，也应尽量使其大角度相交并避开主断层。

## 2、建筑物类型选择和结构设计

在我国断层极其发育的西南地区，有丰富的水利资源，在那所修建的水利枢纽就不可避免要跨越活断层。

### (1) 坝型选择

对在活断层上修建的大坝，宜采用土石堆填的散体坝，不宜采用混凝土重力坝和拱坝。因前者是一种易变形的柔性体，坝体一般相当宽厚，错移同时也会产生塑变使裂缝闭合。而后者是一种弹脆的刚性体，有少量错动，坝体内就会形成很多裂缝而导致坝整体破坏。使坝体沿坝基接触面断开，破坏相互连接。

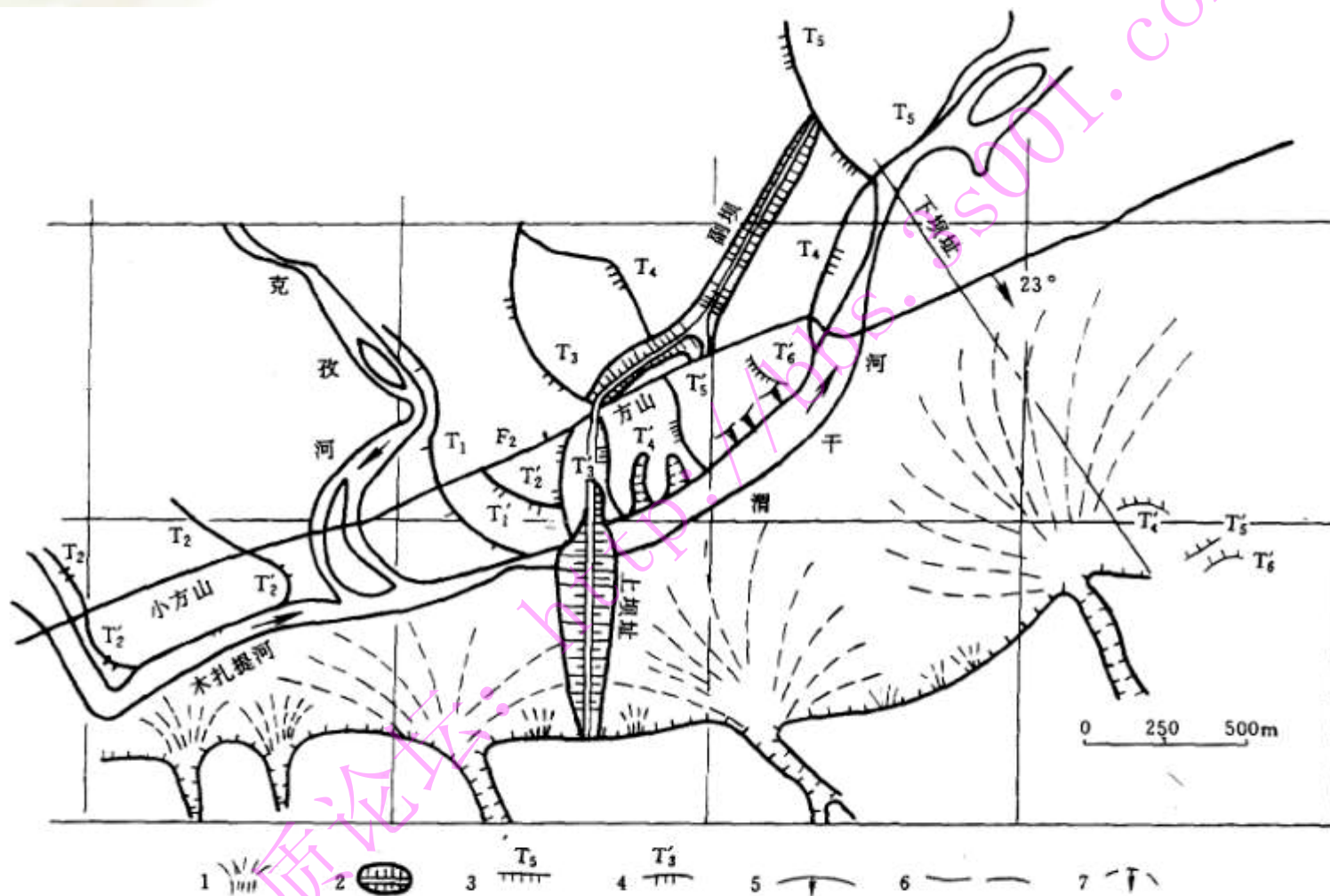


## (2) 结构设计

活断层的最大位移多为5-6米，设计的土坝保证在这样的错动下不会出现大的开裂，不会由于沿错动带的强烈渗流而溃决。所以设计土坝时，主要考虑土坝的开裂和沿开裂带的渗流问题。

一般设计相当厚的粘土心墙，两侧具有无粘性土过渡带的多种土质坝。

## 新疆某水库坝址与活断层的关系



新疆克孜尔水库坝址区及F<sub>2</sub>断层展布示意图

(引自彭敦复, 1996<sup>[34]</sup>)

- 1—洪积扇；2—大坝；3—阶地编号；4—被F<sub>2</sub>错断抬升后的阶地；  
5—断层；6—下坝址轴线；7—滑坡

中国的地震断层（据邓起东、稍加简化补充）

编号	活断层名称	地震日期 (年·月·日)	震级	地点	地 震 断 层				
					走 向	性质	长度 (km)	水平位移量 (m)	垂直位移量 (m)
1	昌马断裂	1932.12.25	7.5	甘肃昌马	北西西	逆	116		4
2	南、西华山断裂	1920.12.16	8.5	宁夏海原	北西~北西西	左旋、逆	230	9	1
3	龙首山断裂附近	1954.2.11	7.3	甘肃山丹	北西西		20	0.2~0.3	
4	花石峡—玛曲断裂	1937.1.7	7.5	青海都兰	北70°西	左旋、逆	300*	8	6~7
5	小江断裂	1733.8.2	7.5	云南东川	北北西	左旋	65		
6	鲜水河断裂	1973.2.6	7.9	四川炉霍	北50°~60°西	左旋、逆	90	3.6	0.5
7	鲜水河断裂	1955.4.14	7.5	四川康定	北西	左旋	20		
8	理塘断裂	1948.5.26	7.3	四川理塘	北西	左旋	75		
9	曲江断裂	1970.1.5	7.7	云南通海	北50°~70°西	右旋、逆	60	2.2	0.45
10	可可托海—二台断裂	1931.8.11	8	新疆富蕴	北20°西	右旋	180	14.6	1~3.6
11	天山北缘断裂	1906.12.23	8	新疆玛纳斯	北西西	右旋、逆		1.8	
12	大洋河断裂西端	1975.2.4	7.3	辽宁海城	北西西	左旋	5.5	0.55	0.20
13	唐山断裂带	1976.7.28	7.8	河北唐山	北北东	右旋、正	8	1.53	0.70
14	贺兰山东麓断裂 <sup>①</sup>	1739.1.3	8	宁夏平罗	北北东	右旋、正	2	1.45	
15	纵谷断裂	1951.10.22	7.3	台湾玉里	北北东	左旋	40	2	1.3
16	大壁断裂	1906.3.17	6.8	台湾嘉义	北东东	右旋	13	1+	
17	郯庐断裂	1668.7.25	8	山东郯城		右旋	120	9	



## 国外部分地震断层概况

活断层名称	地震名称	地震日期 (年.月.日)	震级	断裂长度 (km)	错动位移 (m)	
					水平	垂直
日本根尾谷断层	浓尾	1891.10.28	8.4	90	2 左旋	6
日本丹那断层	北伊豆	1930.11.26	7.0	35	3 左旋	2
日本三河断层	三河	1945.1.13	7.1	9	1.5	2
蒙古博格多断层	戈壁阿尔泰	1957	8.0	272	8.85 左旋	±3
美国圣安德列斯断层	旧金山	1906.4.18	8.3	435	6.4 右旋	5.9
美国赫布根断层	赫布根湖	1959	7.1	24±	—	6 正断
新西兰怀拉拉帕断层		1855		144	12.2 右旋	2.8
土耳其安纳托利亚断层	埃津兼	1939	7.9	350	4.2 右旋	1.5
土耳其安纳托利亚断层	木腊迪耶	1976	7.6	55	3.8 右旋	—

## 本章主要要求掌握

- ❖ 活断层的定义及基本特征
- ❖ 活断层的分类
- ❖ 断层参数定量研究
- ❖ 活断层的识别标志
- ❖ 活断层对工程的影响及断层区的建筑原则