

中国黄土与黄土滑坡

徐张建¹, 林在贯¹, 张茂省²

(1. 西北综合勘察设计研究院, 陕西 西安 710003; 2. 西安地质矿产研究所, 陕西 西安 710054)

摘要: 中国黄土以其地层全、厚度大、分布广和特殊的工程性质而著名于世。在平面上从由山西、陕西和甘肃为主组成的“中央黄土高原”向外展布, 覆盖面积达 $6.3 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。第四纪时期当地干旱、半干旱的气候环境为物质源的形成和以风成为主的物质搬运、黄土堆积及侵蚀作用创造了条件, 造就今日独特的黄土地貌。在此过程中滑坡既是地貌演变的一种结果, 又是过程的积极参与者, 因此认为黄土特有的颗粒组成和工程性质在黄土滑坡的发生、演变中起着重要作用; 总结该方面的研究成果, 并强调这些性质遵循着一条自 NW 向 SE 定向渐变(改善)的规律。以此为基础, 论述“黄土高原”的地貌分区、黄土滑坡分布、滑坡类型及滑坡形成机制问题。在滑坡诱发因素的讨论中, 对地震造成的黄土滑坡给予重点描述。在滑坡防治方面, 以一些工程实例为衬托, 归纳现常用、有效的黄土滑坡治理方法。最后就需要注意研究的几个问题作简要讨论。

关键词: 土力学; 黄土; 工程性质; 地貌; 滑坡; 形成机制; 预防与治理

中图分类号: TU 444

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2007)07 - 1297 - 16

LOESS IN CHINA AND LOESS LANDSLIDES

XU Zhangjian¹, LIN Zaiguan¹, ZHANG Maosheng²

(1. Northwest Research Institute of Engineering Investigation and Design, Xi'an, Shaanxi 710003, China;

2. Xi'an Institute of Geology and Minerals Resources, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: Loess in China is world-famous for its stratigraphical intactness, huge total thickness, vast expanse of distribution and noticeably metastable geotechnical properties. In distribution, loess spreads outward from the “Central Loess Plateau” composed of Shanxi, Shaanxi and Gansu provinces as the main body and blankets a total land area of $6.3 \times 10^5 \text{ km}^2$. During the Quaternary Period, the prevalent arid, semi-arid climatic environment provided the stage on which material sources came into being, grain particles were wind-transported and deposited and loess strata were thus formed, with almost coincident erosion. In this manner, the spectacular loess geomorphological features and landforms evolved. In the processes, the landslides have been either the end results thereof or active participants. The paper puts emphasis on the granulometry and engineering properties which are peculiar to and characteristic of loessial deposits as well as the role they might play in the initiation and evolution of loess landslides, giving them due coverage and reiterating in the meanwhile the fact that there exists a regular, gradual change(amelioration) of the main geotechnical properties of loess in the direction from Northwest to Southeast all across the “Loess Plateau”. From this point, the paper proceeds to discussion of such problems as geomorphological zonation, landslide distribution, structural features of loess landslides as well as their sliding mechanisms. In the brief review of landslide-triggering problems, that of seismic landslides is given due attention. This is followed by a summing-up of the methods of landslide prevention and remediation that are currently in use

收稿日期: 2006 - 12 - 01; **修回日期:** 2007 - 01 - 31

作者简介: 徐张建(1964 -), 男, 1985年毕业于西安地质学院水文地质与工程地质专业, 现任教授级高级工程师、总工程师, 主要从事黄土地区的岩土工程勘察、滑坡与边坡治理、建筑物基础加固与纠偏等方面的研究工作。E-mail: xzjxbzk@126.com, zgb@xbzk.com

in China and have been time and again proven to be effective. As illustrations in this regard, several successful cases and experiences therefrom are cited. Finally, in the closing remarks, the issues that need more attention and further in-depth research are raised and briefly discussed.

Key words: soil mechanics; loess; engineering properties; geomorphology; landslides; formation mechanism; prevention and remediation

1 引言

中国黄土广泛分布在西北、华北与东北地区，尤其集中分布在被称为中央黄土高原的陕西、甘肃、山西以及宁夏等省区。在这里，第四纪迄今独有的气候沉积环境形成的黄土在地层学上连续完整、厚度巨大；在粒度成分上有既全域持稳又定向渐变的特点；在主要工程性质上突出表现为欠固结性(上部)、轻度超固结性(深部)与易侵蚀性。这些工程性质，与粒度成分一样，都具有自 NW 向 SE 定向渐变的趋势。

在这样的气候、沉积以及地层环境中，地貌的发展演变也具有相应特殊的过程，产生了气候、地层与地貌上统一的动力地质作用及其产物——黄土滑坡。在西部大开发中正确认识黄土滑坡，掌握好其勘察、设计与治理方法，显得愈益重要。本文的目的是试图简要归纳一下迄今积累的对黄土滑坡的研究成果和关于黄土滑坡的防滑治滑实践经验，为选择新的研究方法、制定新的防滑治滑措施及提高防滑治滑设计水平提供参考。

2 中国黄土的分布与工程性质

2.1 中国黄土的分布

中国黄土主要分布于习称黄土高原区的黄河中上游的甘肃、陕西、宁夏、山西、河南与青海等省区。其次为河北、山东、辽宁、黑龙江、内蒙古和新疆等省区。除此之外，在长江中下游地区还有同期的、风成作用是主因的、颗粒组成类似的黏性土堆积，如下蜀黏土(亦称“下蜀黄土”)。以上总面积约 $6.3 \times 10^5 \text{ km}^2$ ，占中国陆地面积的 6.6%，中国黄土分布见图 1。

应该指出，上述堆积虽系同一时间同一物质搬运过程的产物，其堆积后的成岩环境却有较大差别，因此以下蜀黏土为代表的堆积在工程性质上表现为明显的超固结性而不具湿陷性。本文将秦岭山脉以北的黄土为主要研究对象。

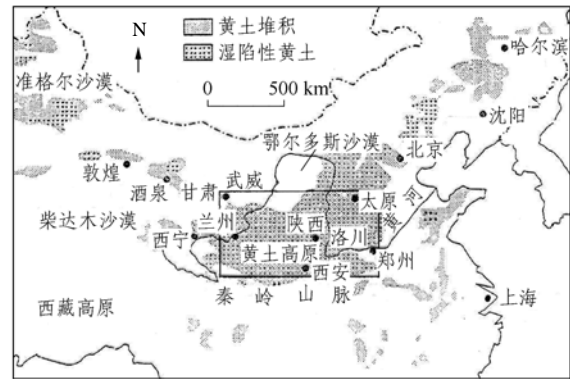


图 1 中国黄土分布
Fig.1 Distribution of loess in China

2.2 地层特性

中国黄土地层全、厚度大(兰州地区西津村最大厚度达 400 m)，记录与保存了整个第四纪时期的地理、气候、堆积环境与生物进化过程及其变化。图 2 为中国黄土的一个典型剖面。

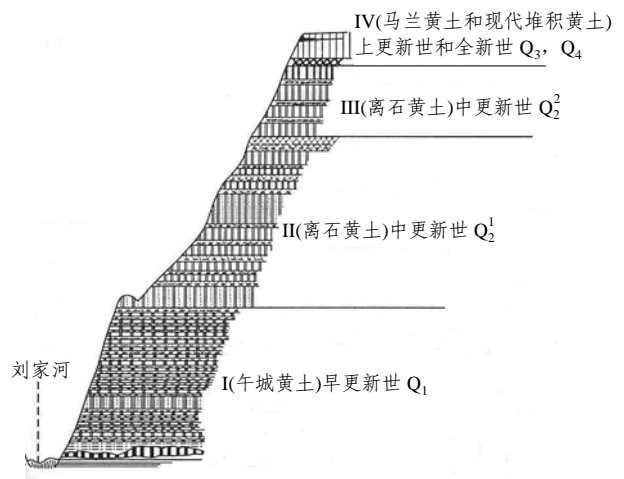


图 2 中国黄土的一个典型剖面
Fig.2 A typical profile of loess in China

2.3 颗粒组成

在整个第四纪时期黄土的颗粒组成总体上是持稳的，而在这个持稳的背景下它又显示出了自 W 向 E，由 N 向 S 由粗变细的变化^[1]，见图 3。这种稳定反映了地理、气候与堆积环境的稳定，佐证了黄土的风成学说。当然，多层褐色土型古土壤的存在说

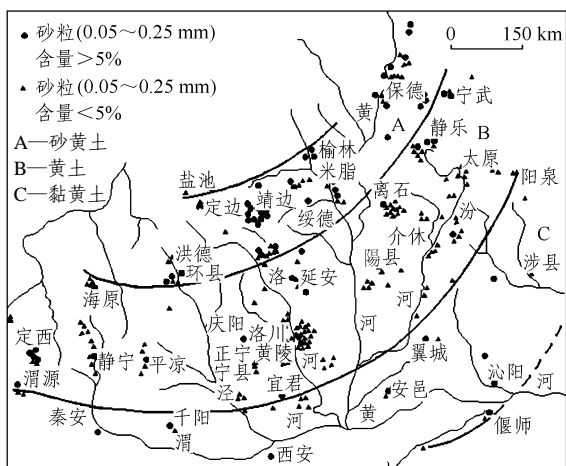


图 3 黄土高原黄土粒径分带

Fig.3 Granulometric zoning of the Loess Plateau

规律。图 4 是我国黄土的一种工程地质分区, 它的基础就是符合这个总规律。表 1 是图 4 中的 I 区、II 区及 6 个区黄土的平均工程性质。图 5 则是上述总规律的一种概括性表示; 而图 6 给出的是自重湿陷性黄土在遭浸水时可能造成的严重破坏^[1~3]。

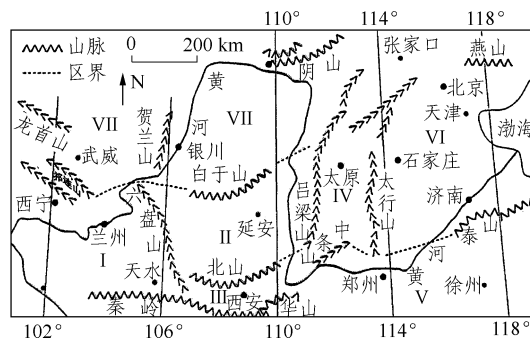


图 4 中国黄土的工程地质分区

Fig.4 Engineering geological zonation of loess in China

明了在总体稳定环境下的气候脉动。

2.4 工程性质

黄土具有不同于其他土类的 4 个方面的工程性质, 这些工程性质在不同的工程和环境条件下, 在滑坡的形成与演变中或工程边坡的性状中起重要作用。

(1) 湿陷性

湿陷性又分自重湿陷和非自重(在自重和外荷共同作用下)湿陷两种表现。在中国的中央黄土高原及其周邻, 黄土的湿陷性强烈程度和自重湿陷性高低在平面上具有自 NW 向 SE 方向减弱, 在剖面上则有自新黄土至老黄土沿深度减弱, 直至消失的总

同时, 还应注意, 在达到饱和状态之前, 随着土中含水量的渐增, 土样表现为压缩性增高, 相应的以湿陷系数(δ_s)表示的湿陷性降低, 见图 7。

(2) 结构性与结构强度

由于其特殊的堆积环境与成岩作用过程、颗粒组构的微观结构特点、可溶盐的存在与赋存形式及基质吸力, 黄土试样往往显示有一定的结构性。如图 8 所示, 土样只有在固结压力 σ_3 达到并超过 σ_{3cr} 后其侧压力系数 K_0 才显示为常值。图 9 显示只有在

表 1 不同分区的物理力学性质指标试验值(均值)

Table 1 Soils laboratory test results(mean values) of physico-mechanical indices for different zones

分区	时 代	物理力学性质指标											
		天然含水 量 $w/\%$	重度 γ $/(kN \cdot m^{-3})$	孔隙 比 e	液限 $w_l/\%$	塑性指数 $I_p/\%$	自重湿陷 系数 δ_{zs}	湿陷起始压 力 P_{st}/MPa	先期固结压力 (天然状态) p_c/MPa	先期固结压力 (饱和状态) p_c/MPa	砂粒含量 $\%$	粉粒含量 $\%$	黏粒 含量 $\%$
甘肃省 (I 区)	Q ₃	8.98	14.58	1.032	27.60	9.37	0.052	0.135	0.508	0.137	11.20	78.75	10.05
	Q ₂ ²	6.79	15.37	0.868	26.87	7.34	0.054	0.270	2.047	0.287	10.00	76.00	14.00
	Q ₂ ¹	4.90	16.20	0.742	26.40	8.90	0.051	1.000	3.800	1.040	9.00	77.00	14.00
陇东与陕北 (II 区)	Q ₃	13.38	14.70	1.105	29.90	11.20	0.023	0.092	0.835	0.097	13.20	65.80	21.00
	Q ₂ ²	15.30	16.40	0.924	30.90	12.20	0.014	0.416	1.224	0.473	15.00	68.10	16.90
	Q ₂ ¹	18.10	18.30	0.760	30.60	12.30	0.008	0.684	1.680	1.615	12.00	64.00	24.00
	Q ₁	20.10	18.50	0.773	31.10	11.70	0.003		1.856	1.615	13.00	70.00	17.00
6 个区(I~V 和 VII 区)	Q ₃	13.21	15.26	1.016	28.62	10.86	0.015	0.137	0.580	0.158	10.96	70.70	18.34
	Q ₂ ²	12.85	16.26	0.884	29.11	10.79	0.018	0.419	1.380	0.453	15.19	68.62	16.19
	Q ₂ ¹	13.09	17.23	0.783	29.01	11.25	0.026	0.981	2.148	1.036	12.25	69.87	17.88
	Q ₁	20.10	18.55	0.773	31.05	11.65	0.003		1.855	1.615	13.00	70.00	17.00

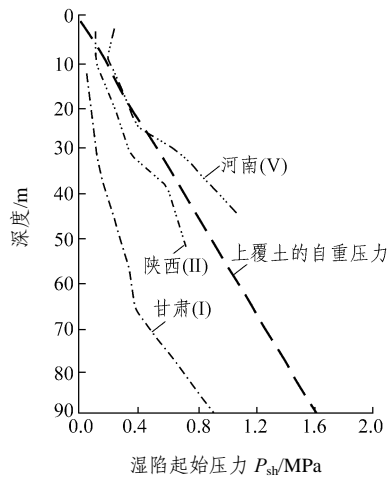


图5 黄土湿陷起始压力与上覆土深度的关系

Fig.5 Characteristic generalization of the initial collapse pressure-overburden depth relationships



图6 在Q4和Q3黄土中浸水造成的试坑与坑周的地面下沉
Fig.6 General view and close-up of ground subsidence in and around test pit caused by flooding(Q4 and Q3 loess)

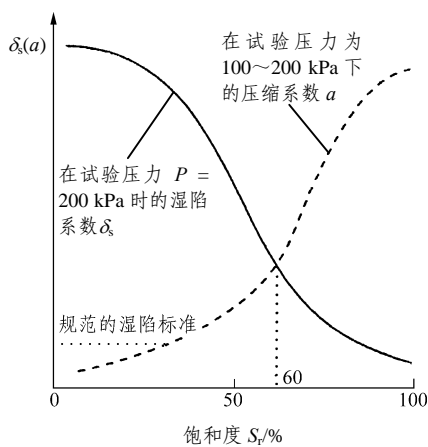


图7 作为饱和度Sr的函数的湿陷系数delta_s与压缩系数a之间的消长关系

Fig.7 Interrelationship between the coefficient of collapsibility, delta_s, and the coefficient of compressibility, a, as a function of the degree of saturation, Sr

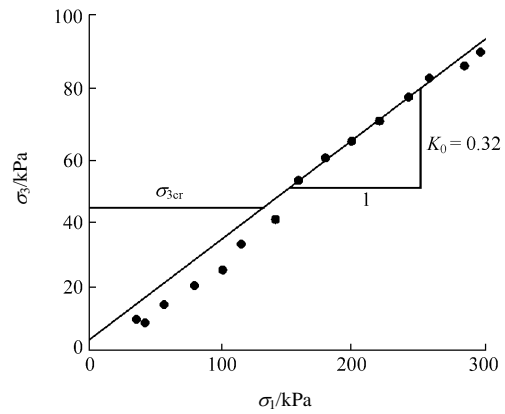


图8 sigma_3-sigma_1关系曲线

Fig.8 Relation curve between sigma_3 and sigma_1

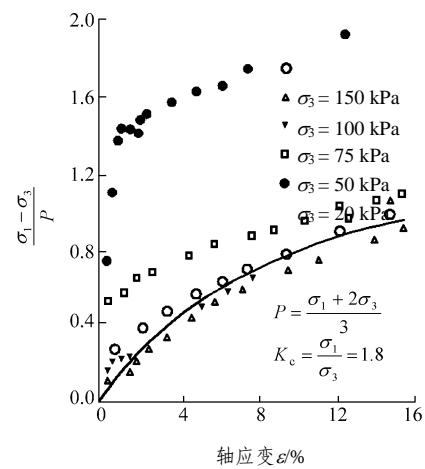


图9 应力-应变归一化曲线

Fig.9 Normalization curves between stresses and strains

固结压力达到或超过 75 kPa 之后, 试验土样的 $\sigma_1 - \sigma_3$ 与轴应变 ϵ 关系曲线按 P (即 $(\sigma_1 + 2\sigma_3)/2$) 进行归一化才认为是可行的。与此同时, 图 10, 11 则分别表示了两个不同深度的黄土试样 q (即 $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$)- ϵ_1 的关系, 此关系也反映了结构性与黄土形成年代的关系^[1~3]。

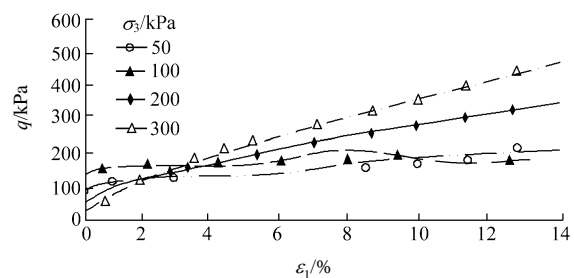


图10 西安(深度≤10 m)土样的 q-epsilon_1 曲线

Fig.10 q-epsilon_1 curves of soil samples from Xi'an(depth≤10 m)

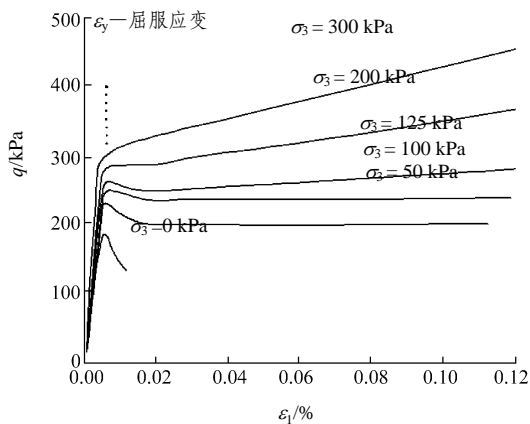


图 11 西安(深度 13.2~17.4 m)土样的 $q-\varepsilon_1$ 曲线
Fig.11 $q-\varepsilon_1$ curves of soil samples from Xi'an(depth: 13.2 - 17.4 m)

随着土样天然湿度的增高, 其结构强度相应降低, 直至达到饱和状态。这时的强度可称残余结构强度, 在地基基础设计中称之为湿陷起始压力, 其值相当于土力学中饱和土样的先期固结压力。

(3) 吸水势

吸水势亦称基质吸水势。与膨胀土一样作为典型的非饱和黏性土之一的黄土在低含水量状态下常有很高的且不同于一般的吸水势。吸水势的力学效果是一种负孔隙水压力效应, 使黄土具有很高的强度。这种强度随着含水量(饱和度)的增高而降低。一般, 当含水量超过 25%或土的饱和度大于 65%时, 由吸水势产生的负孔隙水压力效应就降得较低, 直至消失, 这时, 黄土的强度也会降得很低。图 12^[4]就说明了这种情况。

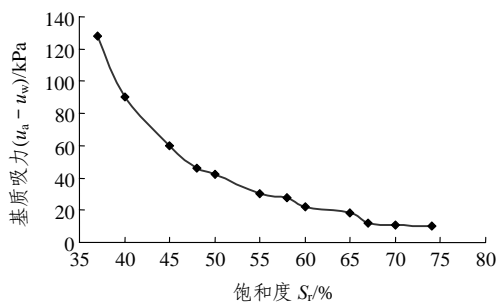


图 12 西安杨凌黄土(Q₃)的水土特征曲线^[4]
Fig.12 Soil-water characteristic curve of a loess(Q₃) sample from Yangling, Xi'an, Shaanxi Province^[4]

(4) 滑带黄土的抗剪强度

除过与吸水势有密切关系外, 与众多岩土体一样, 黄土的抗剪强度亦有显著的峰值和残值之分, 二者的差值很大。表 2 是对黄土滑坡中滑带土的分类, 表 3 列示了不同类型滑带土的力学特征^[5]。

表 2 黄土滑坡滑带土类型

Table 2 Classification of sliding bed soil types in loess landslides

滑带土物质组成分类及年代		滑带土物理性质分类
黄土	马兰黄土(Q ₃)	粉质滑带土
	离石黄土(Q ₂)	
	午城黄土(Q ₁)	黏性滑带土
黄土与下伏基岩风化物混杂物(Q ₄)		
基岩中软弱夹层(不同时代)		软岩滑带土

表 3 不同地区、不同类型滑带土力学特征^[5]

Table 3 Mechanical characteristics of different sliding bed soil types in different regions^[5]

滑带土类型	渗透系数 $k/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	湿陷系数 δ_s	抗剪强度指标			
			黏聚力 c/kPa		内摩擦角 $\varphi(^{\circ})$	
			峰值	残余值	峰值	残余值
粉质滑带土	$(3\sim7)\times 10^{-4}$	0.01~0.08	15~30	3~15	12~22	8.0~12.0
黏性滑带土	$(5\sim6)\times 10^{-6}$	0	20~130	5~25	10~20	2.5~8.0
软岩滑带土	$<6\times 10^{-6}$	0	50~200	5~25	10~20	2.5~8.0

3 黄土滑坡的分布与类型

3.1 黄土滑坡是黄土高原的一种特殊地貌成分

图 13^[6]是中国黄土高原现状地貌分区的一种概括性表示, 每一类分区有其主要的代表性的地貌成分, 这种地貌成分有塬或可称残塬(如图 14 所示)、梁、峁(如图 15 所示)、大河河谷与阶地(如图 16 所示)与沟壑等。黄土滑坡是散布其中却具有一定分布规律的特殊地貌成份。

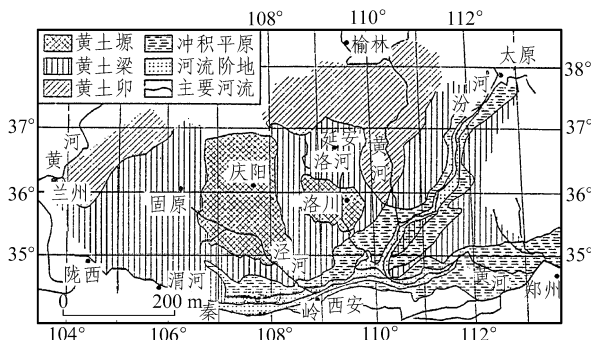


图 13 中国黄土高原的地貌分区^[6]

Fig.13 Geomorphological zonation of the Loess Plateau in China^[6]



图 14 甘肃宁县西峰塬之一部分

Fig.14 Part of Xifengyuan, Ningxian County, Gansu Province



图 15 陕西延安的梁和岭

Fig.15 Ridges and hilly mounds in Yan'an City, Shaanxi Province



图 16 甘肃马莲河的黄土阶地

Fig.16 Loess terraces in Malianhe Valley, Gansu Province

3.2 黄土滑坡的分布

图 17^[7]是一张黄土高原及其周邻的黄土滑坡分布略图, 虽然简略, 却可以看出黄土滑坡分布有一定的群集性, 各个大的群集有其区域性地貌、地层结构、水文与水文地质条件、侵蚀强度与深度等致滑因素组合。例如图中右侧 NS 向分布的条状群集正是黄河峡谷和吕梁山西坡所在处; 中下部从宝鸡往东展布的渭河北岸的线状群集包括了 180 多处大型老滑坡, 有的已经复活或临近复活状态; 中部偏左为六盘山以西的群集, 代表了 1920 年 8.5 级海原地震时产生的滑坡分布等。

卫星影像图和航空照片能够精确、高效地发现 and 测定黄土滑坡的分布, 并提示它们与当地地貌、地质等环境条件的关系。西禹高速的彩红外图像即是很好的例子, 如图 18 所示。

3.3 黄土滑坡的地质结构类型

按滑坡所涉及的土层与结构, 黄土滑坡可分为 3 个类型, 即黄土内滑坡, 滑动面(带)在黄土内部, 沿软弱层滑动; 黄土与基岩接触面滑坡, 滑动面(带)位于下伏的基岩顶面; 黄土-基岩滑坡, 又可分为黄土-基岩顺层滑坡和黄土-基岩切层滑坡^[8]。

(1) 黄土内滑坡

图 19^[5]所示为常见的黄土内滑坡, 其滑动面(带)位于有上层滞水的古土壤的顶部。图 20 所示为新黄土(Q₃)与老黄土(Q₂)的不整合接触面, 也是产生黄土内滑坡的原因之一。此类滑坡多为规模小于 10×10⁴ m³ 的小型滑坡。

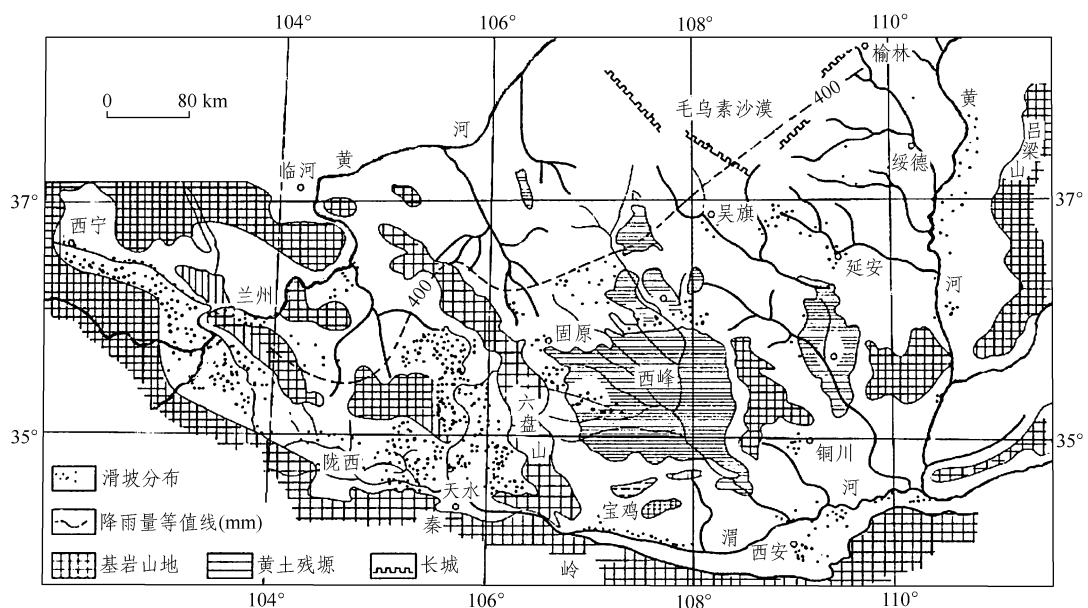


图 17 黄土高原及其周邻黄土滑坡分布略图^[7]

Fig.17 Sketch map of loess landslide distribution in the Loess Plateau and surrounding area^[7]

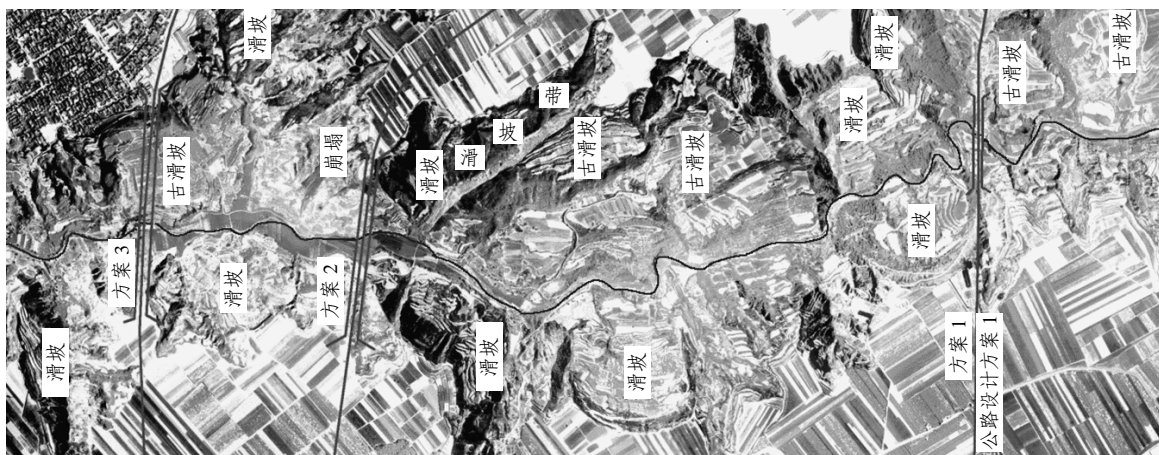


图 18 西禹高速彩红外彩色变换图

Fig.18 Infrared color converted to color image of Xiyu expressway

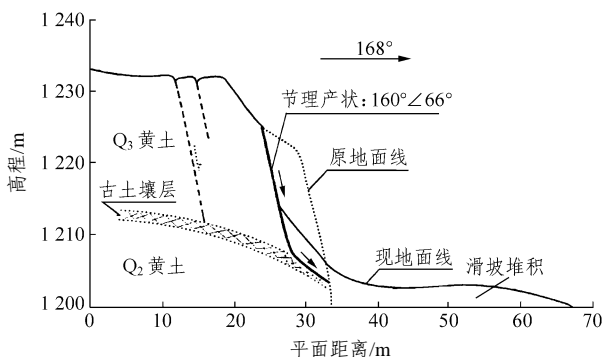


图 19 甘肃西峰长庆桥滑坡剖面^[5]

Fig.19 Profile of Changqingqiao landslide in Xifeng, Gansu Province^[5]



图 21 陕西铜川某地黄土滑坡(滑床为砂泥岩的顶面)

Fig.21 A loess landslide in Tongchuan, Shaanxi Province

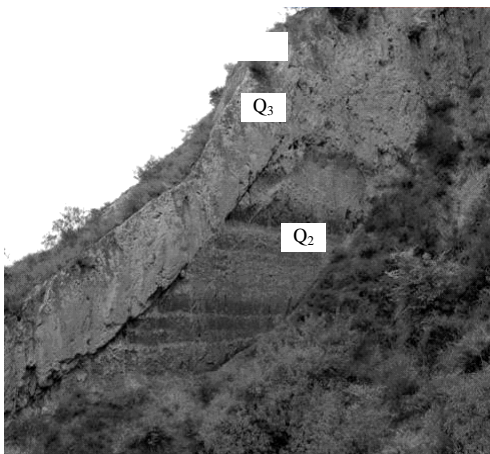


图 20 延安青化砭丈子沟黄土剖面

Fig.20 Loess profile in Zhangzigou, Qinghuabian, Yan'an, Shaanxi Province

(2) 黄土与基岩接触面滑坡

图 21, 22 为黄土与基岩接触面滑坡, 亦比较常见, 其滑动面(带)位于黄土与第三纪、三叠纪或侏罗纪泥岩或砂页岩接触面处。此类滑坡规模多在 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$ 以上, 个别规模超过 $100 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

(3) 黄土 - 基岩滑坡

图 23^[8]系黄土 - 基岩滑坡。从图可见滑动面(带)在以陡倾角穿过黄土层后继以一定的倾角斜切下伏的第三纪地层, 最后在相当长的距离内表现为顺层的、近乎水平的滑动。

4 黄土滑坡的形成机制

4.1 黄土滑坡的诱因

从上述黄土滑坡的分布规律和地质结构特征可归纳出黄土滑坡的诱因主要有如下 4 类:

(1) 黄土高原内部沟壑的深切或河流对塬与高阶地的侧蚀

这类诱因很为常见, 并与区域性的地层堆积侵蚀周期有关联, 见图 24。

(2) 持续降雨或暴雨及经常的大面积灌溉

持续降雨或暴雨是一种自然过程, 经常的大面积灌溉是人为的因素。这 2 个过程都会导致黄土地层中的含水量增大, 稳定性降低, 成为致滑的诱因。图 25 所示的泾河南岸蒋刘滑坡可为一例, 该滑坡原

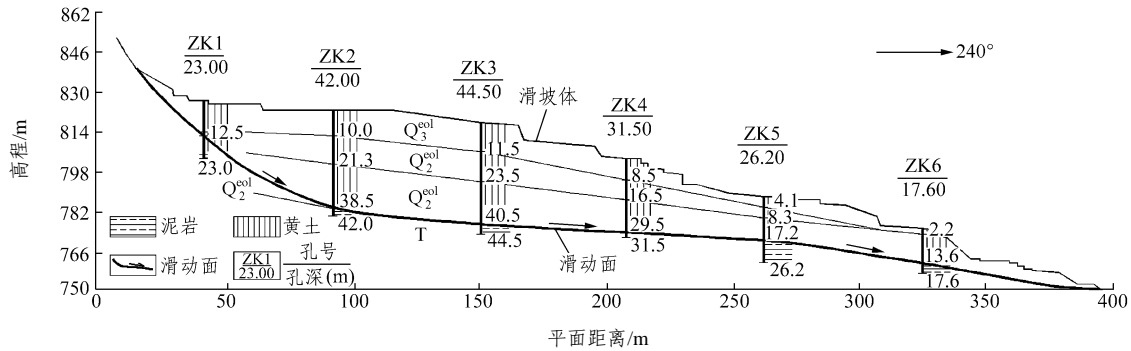


图 22 陕北吴堡 K10 滑坡地质剖面

Fig.22 Geological profile of a landslide K10 at Wubu, North Shaanxi Province

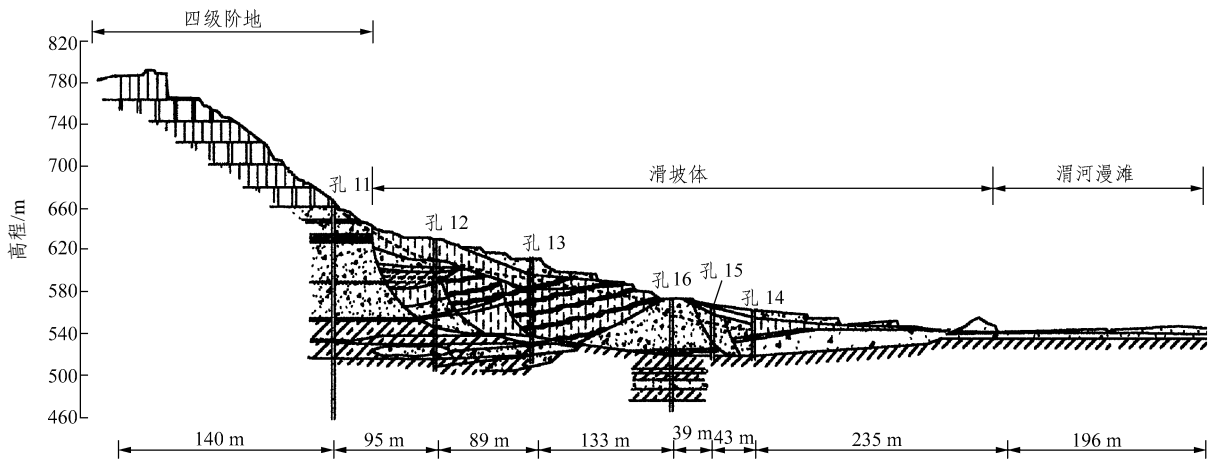


图 23 陕西宝鸡簸箕山滑坡^[8]

Fig.23 Longitudinal section of Bojishan landslide, Baoji City, Shaanxi Province^[8]



图 24 陕西铜川王家凹滑坡

Fig.24 Wangjiaao landslide in Tongchuan City, Shaanxi Province



图 25 关中平原泾河南岸蒋刘滑坡

Fig.25 Jiangliu landslide on south bank of Jinghe River in Guanzhong Basin

系一老滑坡，1984 年雨季末期大规模复活。该年的降雨量远较常年丰沛，雨季历时也长，因而该年与次年发生的黄土滑坡亦多。

上述现象也可以从前述的非饱和土的强度与基质吸力的关系来解释。图 26^[5]为“典型黄土斜坡”的渐进变形破坏模式。黄土土体中含水量的增大，

即是基质吸水势的减小，相应的力学效应则是强度和稳定性的降低。这个过程如果发展下去，如图 27 预示，斜坡就会演变成滑坡。

(3) 人类活动

随着黄土高原经济开发的加强，特别是水利、公路、铁路、采矿、地下建设等工程活动导致的滑坡事件日益受人关注。

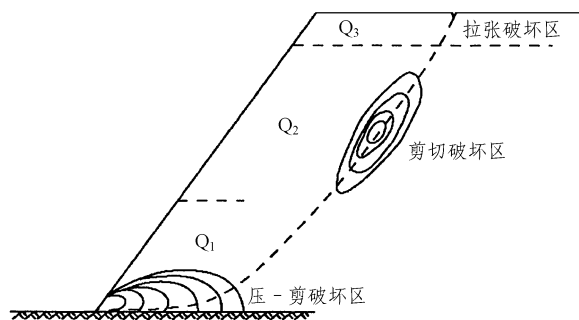


图 26 “典型黄土斜坡”渐进变形破坏模式^[5]

Fig.26 Progressive failure mode for a “typical loess slope”^[5]

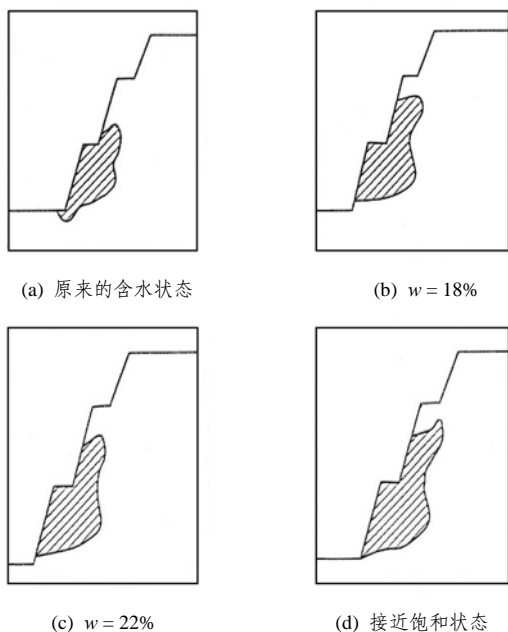


图 27 坡体内的塑性区随着含水量的增大而扩展(绛帐)

Fig.27 In the slope the plastic state zone enlarges in pace with water content increase(at Jiangzhang)

(4) 地震滑坡(这一问题将在节 5 专述)。

4.2 黄土滑坡的形成机制

黄土滑坡的形成与演化过程, 既受构成滑坡的岩土体物理力学性质变化等内在因素的控制, 又受气候、地表(下)水、人类工程活动等外部因素的强烈影响, 且各种因素都是动态变化的, 致使其形成机制十分复杂。按黄土滑坡的主控因素, 可概括出以下 4 类形成机制:

(1) “牵引”错落机制

产生这类变形破坏模式的斜坡往往具有以下特征: ① 黄土节理相当发育, 将土体切割成板块状或楔形体; ② 节理走向与斜坡走向近于一致; ③ 斜坡较陡, 具有临空条件; ④ 滑动位移较小, 且以垂直位移为主。

这类滑坡的形成一般分为 3 个阶段: ① 因风

化、侧蚀或人工开挖, 斜坡整体卸荷松弛, 在坡顶形成拉张应力区, 节理张开并不断向纵深发展; ② 降水或地表水沿裂缝渗入, 使土体含水量增大、强度降低, 或在古土壤层顶面形成上层滞水, 土体有向临空面蠕动趋势, 如图 19 所示; ③ 节理进一步向下扩展, 前缘土体垮落, “牵引”后部板块状土体沿节理面呈阶梯状错落, 如图 24 所示。

(2) 剪切滑动机制

这类变形破坏模式常见于人工开挖形成的黄土高边坡。其变形破坏过程可分为 4 个阶段, 如图 26, 27 所示: ① 人工开挖使边坡应力重新分布, 坡顶出现张裂, 坡脚应力集中, 出现局部剪切破坏(塑性区); ② 坡体蠕动, 边坡中部应力集中, 出现局部的剪切破坏; ③ 剪切带自边坡中部向两侧扩展; ④ 剪切带贯通, 坡体突滑。此类变形破坏模式也可因边坡土体含水量逐渐增大而引起, 如图 27 所示。

(3) 崩滑 - 液化机制

该类变形破坏模式可认为是剪切滑动机制的特例, 常产生于黄土塬与河流阶地接触处, 但其滑动距离大, 危害性更大, 如图 23, 28^[8]所示。其变形破坏过程可分为: ① 塬边高陡黄土斜坡因自然或人为因素产生剪切崩滑; ② 巨大的滑坡体高速冲击到河流阶地表面。因地下水位较浅, 阶地浅部松散砂层产生瞬时液化, 如图 29, 30 所示; ③ 滑坡物质随液化土层长距离漂移, 至能量全部耗尽, 滑坡体完全解体, 形成波浪状地形。



图 28 1983 年甘肃东乡洒勒山滑坡(体积约 $3\ 100 \times 10^4\ m^3$, 滑距超过 1 000 m, 死亡 220 人)^[8]

Fig.28 Sale mountain landslide in 1983(location: Dongxiang, Gansu Province; slide volume: $3\ 100 \times 10^4\ m^3$; slide distance: in excess of 1 000 m; casualties: 220 deaths)^[8]

(4) 蠕滑 - 平移机制

这类滑坡的典型特征是滑面一般发育在近于水平或缓倾坡外的砂、泥岩层顶面, 属黄土 - 基岩接触面滑坡。其形成一般分为 3 个阶段: ① 黄土斜坡

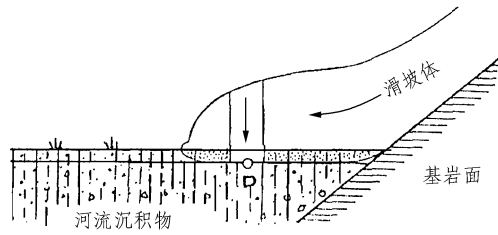


图 29 由一移动的滑坡体对河流沉积物进行不排水加载示意简图

Fig.29 Schematic diagram of undrained loading upon alluvial deposits by a moving landslide mass

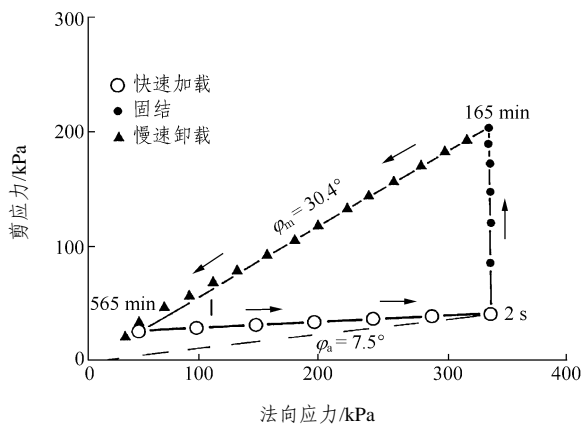


图 30 对洒勒山滑坡的饱和冲积土样($e = 0.49 \sim 0.64$)进行快速加载试验

Fig.30 Rapid loading test on a saturated alluvial deposit sample from Sale mountain landslide ($e = 0.49 \sim 0.64$)

体沿软弱基岩面蠕动，坡面出现弧形裂缝并经降水侵蚀局部发育落水洞；② 强暴雨沿裂缝或落水洞灌入，在静水压力和孔隙水压力联合作用下，土体顺软弱层面平移滑出；③ 前缘土体因临空条件好，转移速度快，中部和后缘土体受牵引呈分块式解体，表现出多个次级滑面，如图 31，32 所示。图中黄土老滑坡的复活也属此类。

5 强烈地震作用下形成的黄土滑坡

中国浩瀚的黄土分布区，尤其是中央黄土高原的西、南与东部及它们的周邻是强烈地震区，其中震级 $M \geq 8$ 级的历史地震就有 6 次之多。

5.1 地震滑坡的分布

图 33^[9]显示了黄土高原及其周邻由历史地震引发的黄土滑坡与震陷的分布情况(1500~1949 年)，图 33 的左下方表示出 1920 年海原地震($M = 8.5$ 级)时产生的规模巨大和较大的滑坡和滑坡群集的分布。

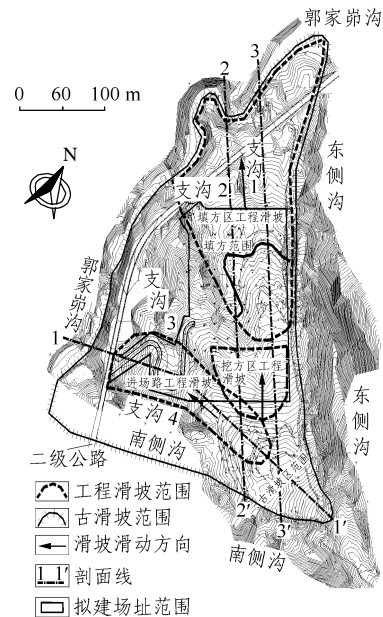


图 31 府谷电厂 K330 变电站古滑坡与工程滑坡分布图
Fig.31 Distribution of old and engineering-related landslides at K330 Substation, Fugu Power Plant

5.2 伴随液化机制的黄土滑坡

在 1920 年海原地震($M = 8.5$ 级)中，该地区及其周邻产生数量众多，常成群集的伴随有液化机制的黄土滑坡。这些滑坡特征之一是其低角度和长滑距，如图 34 所示的回回川滑坡。有的规模巨大，滑坡体还具有波浪状，一浪继一浪的壮观外貌，如图 35 所示。图 36 是对西碑塬滑坡的滑前和滑后的地层结构进行的槽探揭露研究，所获结果证明了砂层液化作用的存在^[9]。

6 防滑治滑

6.1 黄土地区常用的防滑治滑方法

- (1) 改变滑坡体的几何形态
 - ① 改善坡形，削方卸载，减小下滑推力；
 - ② 填筑反压，增大滑床反坡部分的抗滑力。
- (2) 排水
 - ① 地表排水，利用明沟或暗沟将水引出滑区之外；
 - ② 支撑盲沟、渗水盲沟；
 - ③ 大口径钻孔重力疏降滑体内地下水；
 - ④ 仰斜孔(排)疏降滑体内地下水；
 - ⑤ 隧道、廊道疏降滑体内、外地下水。

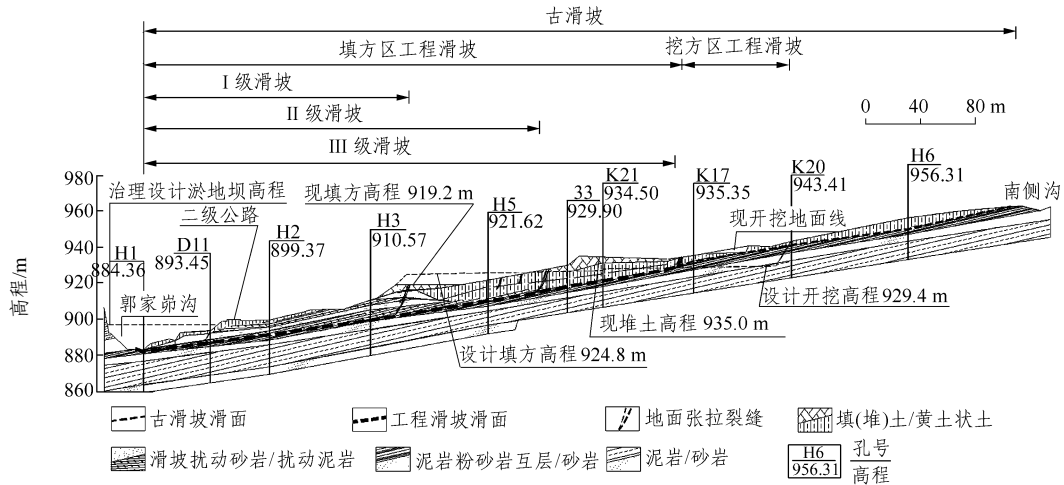


图 32 府谷电厂 K330 变电站古滑坡与工程滑坡剖面图

Fig.32 Profile of an engineering-activated old landslide at K330 Substation, Fugu Power Plant

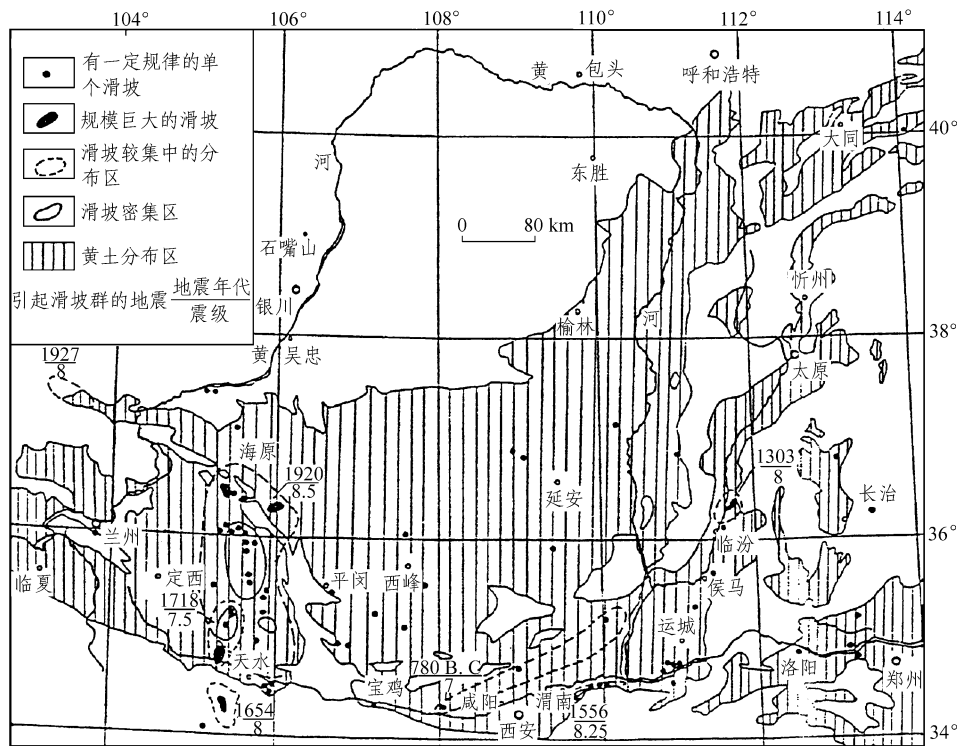


图 33 历史地震滑坡与震陷点位置分布(1500~1949年)^[9]

Fig.33 Location and distribution of historical earthquake-induced landslides and slump failures(from 1500 to 1949)^[9]

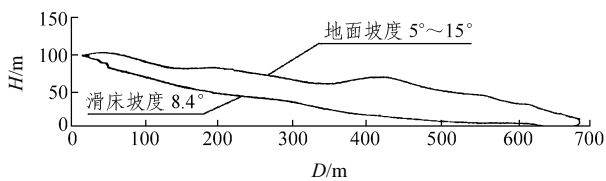


图 34 回回川滑坡纵剖面

Fig.34 Longitudinal section of Huihuichuan landslide

- ① 重力式挡土墙(包括鼠笼墙等);
- ② 锚杆挡土墙;
- ③ 抗滑桩, 预应力锚索抗滑桩, 桩板式支挡结构等;
- ④ 土钉墙。

以上方法在黄土地区常组合采用, 有主有辅。

6.2 治理工程实例

(1) 延安凤凰山滑坡

(3) 支挡结构



图 35 低角度长滑距滑坡的波状地貌景观

Fig.35 Wavy terrain characterizing low-angle long distance slide

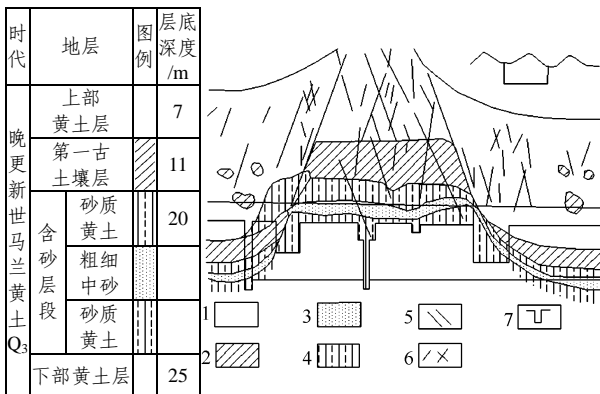


图 36 滑坡地区的原始地层结构和探槽揭露的地层受挤压剪断和砂层液化痕迹

Fig.36 Original stratigraphic structure of the slide area and evidence of thrust faulting and shearing as well as traces of liquefaction

延安凤凰山滑坡系一复活的厚层型黄土老滑坡，采取了地面排水，坡脚反压与抗滑桩相结合的治理措施，效果显著，如图 37，38 所示^[10]。



图 37 延安凤凰山滑坡^[10]

Fig.37 Phoenix Mount landslide in Yan'an city, Shaanxi Province^[10]

(2) 铜黄一级公路冯家河黄土滑坡

滑坡长 300~440 m，宽 1 300 m，厚 25~45 m，最厚处达 60 m，是一大型巨厚层老滑坡。路堑的开挖导致了上方坡体出现了两条拉张裂缝，长 150~220 m，且位移逐渐增大。采取了以仰斜孔疏排坡体中地下水为主的治理方案，见图 39，40。具体治理方案是：沿路堑坡脚设置仰斜排水孔 29 个，孔深 32.5 m，仰角 5°；路堑边坡下设置纵向排水盲沟，总长 320 m；坡顶削方减载，削方平台上设截水沟；坡脚设高 5 m 的抗滑挡墙。经治理工程完成以来 6 余年的地表和深孔位移监测资料显示，效果良好，滑坡稳定^[11]。

(3) 西安临潼骊山滑坡

图 41 是骊山滑坡平面分布。图的右侧为一组多级黄土滑坡和黄土基岩滑坡(骊山 2[#] 滑坡)，一条名为老鸦沟的深沟将其与包括鼻状坡体的骊山 1[#] 滑坡主体分开，后者又因地层结构、物质成分、变形性质与稳定程度的不同分成 3 个区，其中的 I 区是勘察研究与治理的重点。

对骊山滑坡的研究特点之一是监测手段齐全和监测历时长(1991 年至现在)。特别值得指出的是多个全长的和分段的伸张仪的布置对骊山滑坡不同部位之间的变形和位移差异的测定和相应分区的界定起了重要作用。孔内的深部测斜结果则帮助了滑床位置的判定。这一切与勘察结果一道是后续治理设计的可靠基础资料^[12]。

第一期治理对象是骊山 1[#] 滑坡的 I 区。图 42 所示的滑坡结构和治理方案对 I 区而言具有代表性。从中可看出治理设计的正确思路和具针对性的措施。将滑坡分为 A、B 和 C 三个块段，分别采取了抗滑桩、锚索挡墙和锚索抗滑桩 3 种支挡结构，取得了预期效果。现在治理工程已完成数年，发挥着应有作用。

(4) 宝鸡簸箕山滑坡

位于宝鸡市区范围内的一个巨型老滑坡。滑坡后缘即是渭河的四级阶地，前缘系渭河河漫滩，见图 23。在 20 世纪 80 年代，沿该滑坡的腰部出现了数条东西向的长地裂缝并逐年有所发展。鉴于滑坡的腰部下侧有一自西向东的大型灌溉渠道通过，再下是人口集中的繁华市区，因此经勘察后决定对其进行治理，主要的措施是包括平洞的截、排地下水工程，效果良好。

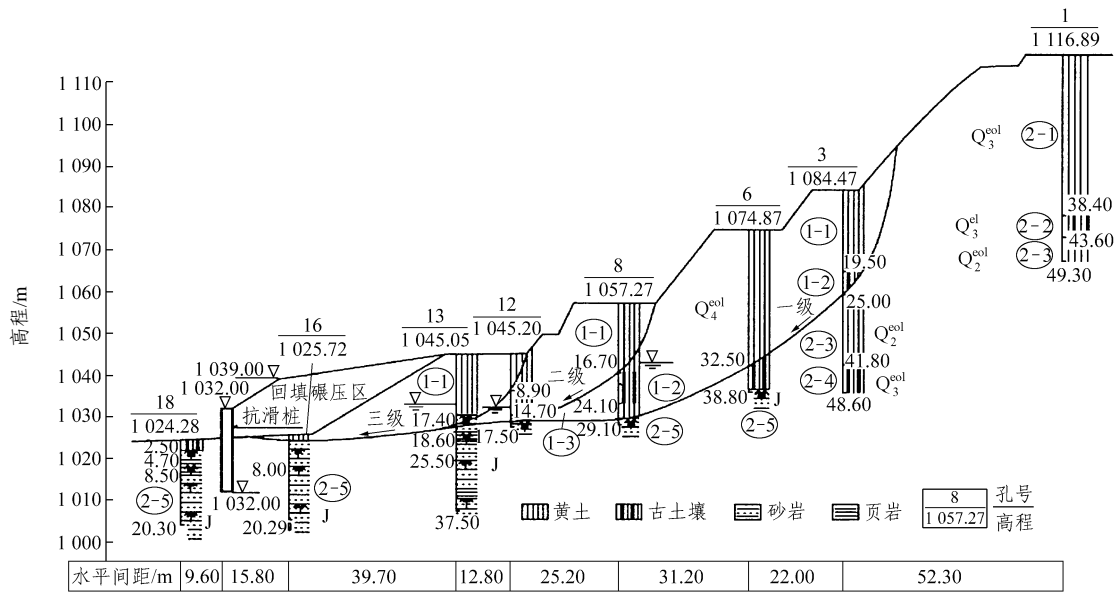


图 38 延安凤凰山滑坡 2 - 2'工程地质剖面^[10]

Fig.38 Engineering geological section 2 - 2' of Phoenix Mount landslide in Yan'an city, Shaanxi Province^[10]

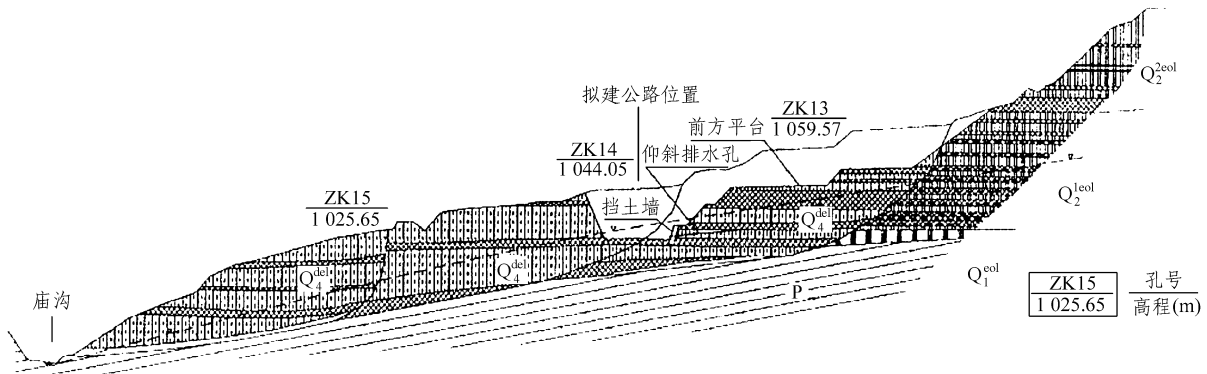


图 39 冯家河黄土滑坡治理工程断面图

Fig.39 Longitudinal section of Fengjiahe landslide and remedial works



图 40 冯家河滑坡的仰斜排水孔

Fig.40 Low angle inclined draining boreholes at Fengjiahe landslide

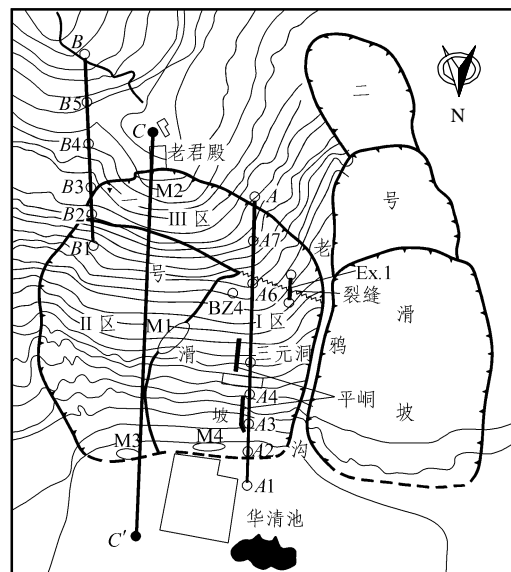


图 41 骊山滑坡范围与伸张计和测斜孔(BZ4)布置图^[12]

Fig.41 Lishan landslide and layout of extensometers and inclinometering borehole BZ4^[12]

7 需要注意继续研究的几个问题

本文简要归纳了有关黄土和黄土滑坡的工程实

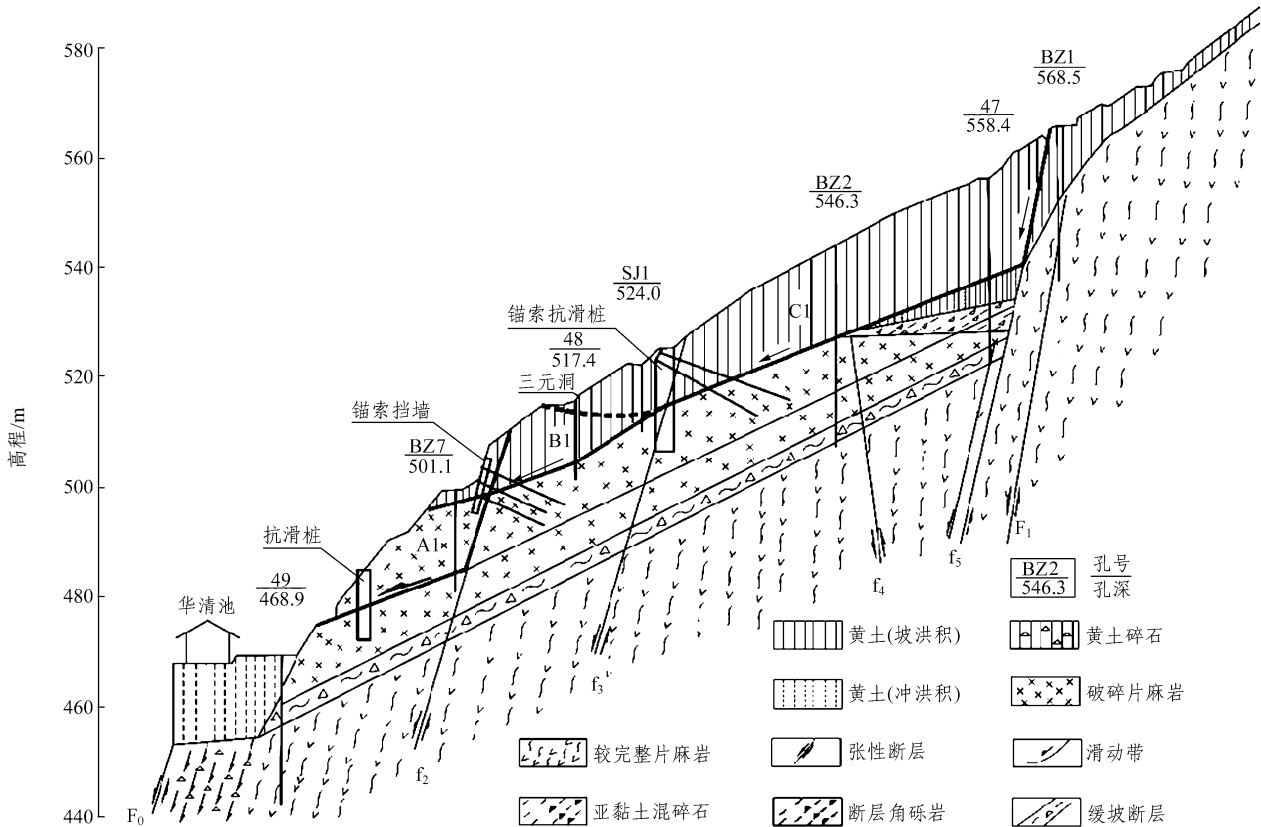


图 42 骊山 1#滑坡 I 区地质剖面与治理工程布置^[12]

Fig.42 Longitudinal geological section of Block I of Lishan landslide #1 and remedial works^[12]

实践经验与研究成就，但需要研究解决的问题依然很多。作为本文的一种小结与建议，在此列举 5 个需要注意继续研究的问题。这方面的新研究成就将会有利于西部地区的开发建设、灾害预测和防灾减灾，也将推动研究工作本身的提高与深入。

7.1 黄土强度的易变性

对黄土斜坡稳定性研究来说，不但要区分强度峰值与残值，结合斜坡或滑坡工况选用试验测试方法，而且应该重视基质吸力这个因素。黄土的强度与含水量之间的关系非常灵敏，因此对基质吸力及其变化在黄土高原地区的地貌演变、滑坡的诱发与演化发展过程中所起作用的研究是很重要的。

7.2 斜坡、滑坡的稳定性评价与下滑推力计算

当今国内的工程实践中通常习用下列两种方法，即：

(1) 当滑面呈折线形时，滑坡稳定系数 K_s 采用下式计算(图 43)^[13]：

$$K_s = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \left(R_i \prod_{j=i}^{n-1} \Psi_j \right) + R_n}{\sum_{i=1}^{n-1} \left(T_i \prod_{j=i}^{n-1} \Psi_j \right) + T_n} \quad (1)$$

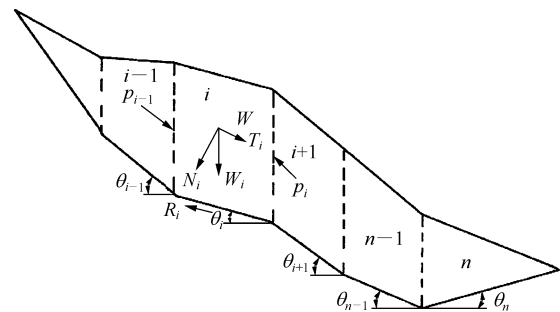


图 43 折线滑面的滑坡稳定系数计算^[13]

Fig.43 Stability factor computation for a non-circular slide plane^[13]

式中： Ψ_j 为传递系数，且有

$$\Psi_j = \cos(\theta_i - \theta_{i+1}) - \sin(\theta_i - \theta_{i+1}) \tan \varphi_{i+1} \quad (2)$$

此法虽有不足，但目前国内众多规范均推荐采用此法进行稳定性或滑坡某一条块处的推力计算，有的在推荐此法的同时也提出了应注意的事项。经多年使用，工程界反映比较简单实用。

(2) 对于相对而言的均质土体，可认为滑面呈圆弧形，采用总应力法或有效应力法计算稳定系数 K_s ^[14]，即

$$K_s = \frac{\sum N \tan \varphi + cL}{\sum T} \quad (3a)$$

或

$$K_s = \frac{\sum (N - u) \tan \varphi' + \sum c'L}{\sum T} \quad (3b)$$

应该看到上述方法远非完善, 因此滑坡的动态观测十分重要, 有条件时反演法常结合使用。今后要作的工作尚多, 特别是滑坡的实际性状的试验监测和数据的积累分析。

7.3 黄土滑坡的致灾预测

多年来, 国内外对滑坡的时间预报和滑动速率预报研究较多, 而对滑坡致灾范围的预测相对较少, 且针对性不强。

目前重大建设工程项目非常重视滑坡灾害预测评估, 但滑坡灾害预测与滑坡机制、规模、滑速及滑坡下方地质环境和社会经济环境等诸多因素有关, 还没有成熟的理论和方法。当前比较有效的研究途径应该是从黄土地区典型滑坡的实际资料入

手, 预测与反演相结合, 提出各类黄土滑坡的灾害评估方法。如王念秦和张倬元^[5]从典型黄土滑坡的实际资料入手, 以与滑移距离关系密切的黄土厚度(h), 斜坡坡度(θ)、滑前滑体长度(l)与滑坡厚度(d)为指标, 提出了一种“典型”滑坡的滑动距离(致灾范围)的预测模型, 即:

(1) 纯黄土滑坡滑距(L)预测公式:

$$L = -124.96 - 1.86h + 3.13\theta + 3.24d + 2.87l \quad (4)$$

(2) 接触面黄土滑坡滑距预测公式:

$$L = -14.72 - 5.55h + 2.49\theta + 20.05d + 2.57l \quad (5)$$

该模型具有一定的探索性, 但滑前滑坡体长度和滑坡厚度难以精确估计, 使模型的实际应用受到限制, 还需继续总结完善。

7.4 公路、铁路、深基坑高边坡的设计

随着“西部大开发”而来的是公路、铁路的建设和大城市中的地下空间的开发利用。公路部门已有的相关研究成果^[15]可供借鉴(见表 4), 在黄土地区这就不可避免地带来高边坡问题, 而且高达 60 m

表 4 黄土高边坡设计建议值^[15]
Table 4 Proposed design approaches for high loess slopes^[15]

主要土工参数	平均年降雨量/mm	30 m < H ≤ 40 m		40 m < H ≤ 50 m		50 m < H ≤ 60 m		H > 60 m		防护方案
		综合坡比	坡型	综合坡比	坡型	综合坡比	坡型	综合坡比	坡型	
(1) Q ₃ : γ _a =12~16 c=10~70 φ=21°~41°	500	1:0.9	阶梯平台式, 每级坡高 5~6 m, 平台宽度	1:1.05	阶梯平台式, 每级坡高 8~10 m, 平台宽度 3~5 m, 单	1:1	阶梯平台式, 每级坡高 8~10 m, 平台宽度 4~6 m, 中间设 10~15 m	1:1.2	阶梯平台式, 每级坡高 8~10 m, 平台宽度 4~6 m, 中间设 15~20 m 宽平台, 单级坡比 1:0.5~1:1	坡顶设截水沟, 平台设截流槽, 坡面设急流槽; 坡脚设防护面墙; 平台植树、三维植草或厚层基材喷播、骨架结合植物的综合防护
(2) Q ₂ : γ _a =14~17 c=24~67 φ=11.9°~41.5°	750	1:1.05	3~4 m, 单级坡比 1:0.4~1:0.5	1:1.1	级坡比 1:0.4~1:0.5~1:0.75	1:1.2	宽平台, 单级坡比 1:0.5~1:0.75	1:1.3		
(3) Q ₃ : γ _a =12.5~14 c=24~62 φ=21.5°~41.5°	350	1:0.8	阶梯平台式, 每级坡高 6~8 m, 平台宽度	1:1	阶梯平台式, 每级坡高 8~10 m, 平台宽度 4~6 m, 单	1:1	阶梯平台式, 每级坡高 8~10 m, 平台宽度 4~6 m, 中间设 10~15 m	1:1.15	阶梯平台式, 每级坡高 8~10 m, 平台宽度 4~6 m, 中间设 15~20 m 宽平台, 单级坡比 1:0.5~1:1	坡顶设截水沟; 平台设截流槽, 坡面设急流槽; 坡脚设防护面墙; 骨架结合植物的综合防护
(4) Q ₂ : γ _a =12.6~16.3 c=49~97 φ=23.1°~44°	600	1:1	3~4 m, 单级坡比 1:0.4~1:0.5	1:1.05	级坡比 1:0.4~1:0.5~1:0.75	1:1.15	宽平台, 单级坡比 1:0.5~1:0.75	1:1.25		
(5) Q ₃ : γ _a =11.4~13.1 c=12~48 φ=16.2°~35°	250	1:0.8	阶梯平台式, 每级坡高 8~10 m, 平台宽度	1:1.05	阶梯平台式, 每级坡高 8~10 m, 平台宽度 3.5~5 m, 单级坡比 1:0.5~1:0.75	1:1.1	阶梯平台式, 每级坡高 8~10 m, 平台宽度 4~6 m, 中间设 10~15 m	1:1.15	阶梯平台式, 每级坡高 8~10 m, 平台宽度 4~6 m, 中间设 15~20 m 宽平台, 单级坡比 1:0.5~1:1	坡顶设截水沟; 平台设截流槽, 坡面设急流槽; 坡脚设防护面墙; 坡面设骨架结合植物护坡
(6) Q ₂ : γ _a =14~17 c=45.5~117.7 φ=26°~41°	500	1:1	3.5~5 m, 单级坡比 1:0.4~1:0.5	1:1.15	单级坡比 1:0.5~1:0.75	1:1.2	宽平台, 单级坡比 1:0.5~1:0.75~1:1	1:1.3		
(7) Q ₃ : γ _a =13.3~16.2 c=21~39 φ=19.8°~26.9°	250	1:1	阶梯平台式, 每级坡高 8~10 m, 平台宽度	1:1.05	阶梯平台式, 每级坡高 8~10 m, 平台宽度 3.5~5 m, 单级坡比 1:0.5~1:1	1:1.15	阶梯平台式, 每级坡高 8~10 m, 平台宽度 4~6 m, 中间设 10~15 m	1:1.2	阶梯平台式, 每级坡高 8~10 m, 平台宽度 4~6 m, 中间设 10~15 m 宽平台, 单级坡比 1:0.5~1:1	坡顶设截水沟, 平台设截流槽, 坡面设急流槽; 坡脚设防护面墙; 坡面采用新型防护带(可结合混凝土或石骨架)护坡
(8) Q ₂ : γ _a =14.2~16.4 c=18~75 φ=23.9°~37°	400	1:1.1	3.5~5 m, 单级坡比 1:0.5~1:0.75	1:1.2	单级坡比 1:0.5~1:1	1:1.25	宽平台, 单级坡比 1:0.5~1:1.15	1:1.35		

注: γ_a单位为 kN/m³; c 的单位为 kPa。

或更高的边坡亦非少见。在理论基础尚未健全, 实践经验不够丰富的条件下, 人们采取的办法有点像“摸着石头过河”。简言之, 建设的需要给人们提供了经验, 通过不断总结和研究, 高边坡的设计方法也在逐步充实。虽不能称完善, 却正被人们逐渐接受、使用和充实。

7.5 黄土地震滑坡机制

黄土地震滑坡是黄土地区的主要地震灾害, 不仅规模大, 而且具有滑速高、滑程远、灾害范围广的特点。黄土地区历次大震触发的滑坡都造成了巨大的灾难, 它造成的经济损失和人员伤亡往往大于地震直接造成的损失。对1920年海原大地震引发的黄土滑坡研究表明, 地震液化是造成低角度黄土滑坡长距离滑移的主要原因, 见图33~35。尽管近20 a来, 对黄土液化和黄土地震滑坡机制研究取得一定进展, 但仍有以下重要问题有待于深入研究:

(1) 不同固结应力与固结应力比条件下黄土液化特性, 以便确定饱和黄土液化地层的深度界限; (2) 强震作用下黄土液化引起的平缓斜坡滑移机制等。

参考文献(References):

- [1] QIAN H J, LIN Z G. Loess and its engineering problems in China[C]// Proceedings of the International Conference on Engineering Problems of Regional Soils. Beijing: International Academic Publishers, 1988: 136 - 153.
- [2] LIN Z G. Variation in collapsibility and strength of loess with age, genesis and properties of collapsible soils[C]// Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Genesis and Properties of Collapsible Soils. Southborough, UK: Kluwer Academic Publishers, 1994: 247 - 263.
- [3] 王永炎, 林在贯. 中国黄土的结构特征及物理力学性质[M]. 北京: 科学出版社, 1990.(WANG Yongyan, LIN Zaiguan. Structural features and physico-mechanical properties of loess in China[M]. Beijing: Science Press, 1990.(in Chinese))
- [4] 邢义川. 非饱和土的有效应力与变形——强度特性规律的研究[博士学位论文][D]. 西安: 西安理工大学, 2001.(XING Yichuan. Research on effective stress and deformation—strength characteristics unsaturated soils[Ph. D. Thesis][D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2001.(in Chinese))
- [5] 王念秦, 张倬元. 黄土滑坡灾害研究[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 2005.(WANG Nianqin, ZHANG Zhuoyuan. Study on loess landslide disasters[M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 2005.(in Chinese))
- [6] DERBYSHIRE E, MENG X M, WANG J T, et al. Collapsible loess on the loess plateau of China[C]// DERBYSHIRE E, DIJKSTRA T A, SMALLEY I J ed. Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Genesis and Properties of Collapsible Soils. Southborough, UK: Kluwer Academic Publishers, 1994: 267 - 293.
- [7] 靳泽先, 张世武. 地质灾害的分布规律及其应用[J]. 甘肃科学学报, 1996, 8(增): 123 - 128.(JIN Zexian, ZHANG Shiwu. Factors governing the distribution of landslide hazards and their application[J]. Gansu Science Bulletin, 1996, 8(Supp.): 123 - 128.(in Chinese))
- [8] 吴玮江, 王念秦. 甘肃滑坡灾害[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 2006.(WU Weijiang, WANG Nianqin. Landslide hazards in Gansu Province[M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 2006.(in Chinese))
- [9] LIN Z G, SASSA K, BAI M X, et al. Undrained loading and soil liquefaction in the evolution of low angle long travel distance landslides in regions of loessial terrain[C]// Proceedings of the 3rd Multi-lateral Workshop on Development of Earthquake and Tsunami Disaster Mitigation Technologies and Their Integration for the Asia-Pacific Region. Manila, Philippines: [s. n.], 2000: 39 - 43.
- [10] 张允周, 徐张建. 延安凤凰山滑坡勘察与治理[C]// 中国建筑学会工程勘察分会编. 第六届全国岩土工程实录交流会岩土工程实录集. 北京: 兵器工业出版社, 2004: 284 - 290.(ZHANG Yunzhou, XU Zhangjian. Investigation and remediation of Mount Phoenix landslide, Yan'an city[C]// Proceedings of the 6th National Symposium on Geotechnical Engineering Case Histories, Division of Geotechnical Engineering, China Construction Society. Beijing: Publishing House of Ordnance Industry, 2004: 284 - 290.(in Chinese))
- [11] 汪兴宇, 赵之胜, 赵久柄, 等. 铜黄公路滑坡分析与综合治理研究[R]. 西安: 陕西省高速公路建设集团公司, 陕西省公路勘察设计院, 2002.(WANG Xingyu, ZHAO Zhisheng, ZHAO Jiubing, et al. Analysis of landslides along Tongchuan—Huangling Highway and research on their multi-approach remediation[R]. Xi'an: Expressway Construction Group Corporation, Shaanxi Province; Highway Investigation and Design Institute, Shaanxi Province, 2002.(in Chinese))
- [12] LIN Z G. Huaqing Palace, Xi'an city, China and landslide hazards[C]// International Symposium on Natural Disaster Prediction and Mitigation. Kyoto, Japan: [s. n.], 1997: 299 - 307.
- [13] 中华人民共和国国家标准编写组. GB50330 - 2002 建筑边坡工程技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB 50330 - 2002 Technical code for building slope engineering[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2002.(in Chinese))
- [14] 中华人民共和国行业标准编写组. TB10027 - 2001, J125 - 2001 铁路工程不良地质勘察规程[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2001.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. TB10027 - 2001, J125 - 2001 Code for unfavorable geological condition investigation of railway engineering[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2001.(in Chinese))
- [15] 李子青, 赵之胜. 黄土地区公路高边坡防护技术研究[R]. 西安: 陕西省公路勘察设计院, 长安大学, 2005.(LI Ziqing, ZHAO Zhisheng. Research on highway high slope protection technology in loess regions[R]. Xi'an: Highway Investigation and Design Institute, Shaanxi Province, Chang'an University, 2005.(in Chinese))