

HUANGFANQU GONGLUTU DE
CHUZHJ JISHU YANJIU

黄泛区公路土的处置

技 术 研 究

姚占勇 著



人民交通出版社
China Communications Press

Huangfanqu Gonglu Tu de Chuzhi Jishu Yanjiu

黄泛区公路土的处治技术研究

姚占勇 著

人民交通出版社

内 容 提 要

本书共分四章,内容包括黄泛区土的工程特点、黄泛区粉土压实技术、无机结合料稳定黄泛区土的工程技术、黄泛区公路地基与路基处治技术。本书可供从事道路工程设计与施工的技术人员参与,也可供高等学校相关专业高年级本科生及研究生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

黄泛区公路土的处治技术研究/姚占勇著. —北京:
人民交通出版社,2013.4
ISBN 978-7-114-10288-2

I. ①黄… II. ①姚 III. ①黄河流域—道路工程—
地基处理—研究 IV. U416.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 000255 号

书 名: 黄泛区公路土的处治技术研究

著 作 者: 姚占勇

责任编辑: 曲 乐 刘永超

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京密东印刷有限公司

开 本: 720×960 1/16

印 张: 10.25

字 数: 150 千

版 次: 2013 年 4 月 第 1 版

印 次: 2013 年 4 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-10288-2

定 价: 28.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

前 言

在我国东北的南部,以及长城以南、秦岭以北,西迄青海东部、东至海滨的广大黄河流域,都广布黄土。黄土质地均匀,粉粒含量占 60% ~ 70%,但缺乏团粒结构,粒间的固结主要依赖硫酸钙质,极易流失。据初步统计,黄河中游地区每年每平方公里中被冲刷外移的土壤约为 3 700t,该地区土壤侵蚀模数量是全世界的 27.5 倍。由于黄河的洪水挟带大量泥沙,进入下游平原地区后迅速沉积,主流在漫流区游荡,人们开始筑堤防洪,行洪河道不断淤积抬高,使之成为高出两岸的“地上河”,在一定条件下就会决溢泛滥,改走新道。黄河下游河道迁徙变化的剧烈程度,在世界上是独一无二的。有文字记载,黄河曾经多次改道。大量的泥沙随黄河的泛滥、改道,沉积于西起郑州附近,北抵天津,南达江淮,纵横 25 万 km² 的范围内,包括山东、安徽、河南、江苏、河北等的广大区域,形成我国特有的、土质以粉土为主的黄河冲(淤)积平原。在山东,黄河冲(淤)积粉土遍布菏泽、济宁、德州、滨州、济南、淄博和潍坊等广大地区,覆盖面积达 52 100km²,约占山东省总面积的 34%。因黄河冲(淤)积平原多由黄河水泛滥而成,通常又称为黄泛区或黄泛平原区。

由于黄泛区平原粉土特殊的成因,其颗粒分布和结构具有其独有的特征。在土层构造上,呈层状分布,部分区域中间夹杂黏土层;粒径分布上,土颗粒均匀,0.074 ~ 0.002mm 的粉粒含量一般为 70% ~ 80% 以上,黏粒含量极低,一般不足总量的 10%;孔隙率高,压缩性较大;地下水位较高,地基沉降量较大;颗粒构造上,颗粒磨圆度较高;毛细管发达,毛细作用剧烈。

粉质颗粒的大量存在导致黄泛区粉土级配较差,由于缺乏细颗粒的填充作用,加之颗粒的表面较圆滑,孔隙率高,使得该类土难以压实,压实含水率不易控制,压实后表面松散,难以达到较高的压实度,且压实后强度不高,导致路面结构的软支撑并很快发生路面结构的早期病害。

由于砂石料的严重缺乏,无机结合料稳定土成为该区域常用的底基层,甚至

是基层材料。石灰、水泥、粉煤灰是常用的结合料。但黏粒的严重不足,使得无机结合料与土间的离子交换、火山灰反应和化学激发作用很少发生,严重影响了稳定土强度的形成。二灰(石灰、粉煤灰)稳定土具有较高的后期强度,但由于影响二灰稳定土强度的因素众多,各因素对二灰稳定黄泛区土强度的影响规律并不十分清楚,导致区域内的二灰稳定土在配合比设计、碾压、养生等方面的偏差,直接影响二灰稳定土质量。

由于黄泛区特殊的土质和水文地质条件,路基工后沉降量较大。其中地基的沉降约占路基总沉降的 70% ~ 80% 以上,成为影响该区域行车安全、舒适,并导致路面结构早期病害的重要原因之一。黄泛区地基土质主要为粉粒含量和磨圆度很高的粉质土,且地下水位高,层间常常夹杂厚度不一的软泥层,地基的压实较为困难。采取何种经济有效的工程技术措施最大限度地减少公路地基的工后沉降,如何控制地基的压实标准,是工程界关心的技术问题。

由于黄泛区特殊的地基和路基条件,以及交通量大、重车多的现实,路面结构的早期病害一直是困扰该区域公路建设和养护的难题。针对该区域特点,结合作者对山东省黄泛区公路工程的研究和工程实践,本书系统介绍了黄泛区土的工程性质、压实特性、施工工艺,稳定土的材料特性、配合比设计方法、施工工艺和养生技术,路基、地基的沉降规律,地基处置技术和方法,以及路床区处置技术等。希望本书的出版对于该区域公路建设和养护工作有所帮助。

在本书的撰写过程中,得到了山东省公路局、山东高速集团有限公司有关工程项目的支持,在此一并表示感谢!

本书的编辑、出版和发行得到了人民交通出版社的大力支持,在此致以衷心感谢!

由于精力、水平所限,本书难免有错误之处,敬请读者指正!

作 者

2012 年 12 月于山东大学

目 录

第一章 黄泛区土的工程特点	1
第一节 黄泛区土的组成特点	1
一、土的成型剖面	1
二、土的主要物质组成	5
三、土的颗粒组成	10
第二节 黄泛区土的物理、力学特性	12
一、物理力学指标	12
二、土的动力特性	20
三、土的渗透性	22
第三节 土的微观结构	24
第四节 黄泛区土的分类	26
第二章 黄泛区粉土的压实技术	28
第一节 重型击实下的黄泛区土的压实规律	28
一、粉土的压实性状与压实机理	29
二、击实功对土的压实的影响	32
三、不同压实度条件下黄泛区粉土的强度与压缩性	34
第二节 黄泛区粉土的施工压实工艺	35
一、粉土的频率响应特性	36
二、粉土的现场碾压工艺	37
三、黄泛区粉土其他压实技术	42
第三章 黄泛区无机结合料稳定土的工程技术	43
第一节 石灰稳定黄泛区土	43
一、石灰的活性与石灰稳定土的原理 ^[75]	43
二、消石灰稳定土与综合稳定土	45

三、生石灰稳定土·····	48
四、黄泛区石灰土强度机理·····	49
第二节 二灰稳定黄泛区土·····	50
一、二灰土的强度机理·····	51
二、二灰土原材料·····	65
三、二灰稳定黄泛区土的最大干密度与最佳含水率·····	68
四、二灰稳定黄泛区土配合比·····	80
五、气候与环境对二灰黄泛区土强度的影响·····	106
六、二灰稳定黄泛区土碾压工艺·····	115
第四章 黄泛区公路地基与路基处治技术·····	122
第一节 黄泛区公路地基的沉降规律·····	123
一、黄泛区公路地基不同阶段地基沉降规律·····	123
二、黄泛区公路地基压实度和处治深度对地基工后沉降的影响规律·····	128
第二节 黄泛区公路地基和路床区的处治技术·····	132
一、黄泛区公路常用的地基处治技术·····	132
二、黄泛区高速公路地基处治案例·····	133
三、黄泛区公路路床区处治技术·····	145
参考文献·····	148

第一章 黄泛区土的工程特点

第一节 黄泛区土的组成特点

土的组成是物质在特定的地质、气候环境下迁移转化和积聚的结果,其组成包括土的成层构造、化学组分、矿物组成和颗粒组成。以下从土的成型剖面、土的主要物质组成和土的颗粒组成三方面来阐述黄泛区土的组成特点。

一、土的成型剖面

距今约 10 万年前,黄河携带大量黄土高原的泥沙进入中下游平原。随地壳振荡式下沉,河身的反复摆动,开始了塑造黄河冲(淤)积平原的历程。成土物源来自于黄土高原的黄土。进入全新世,黄土仍是塑造平原地形的物源。公元前 9500 年开始,黄河冲(淤)积平原经历了全新世完整的海水进退旋回,于公元前 2500 年结束。在公元前 6000 年的海侵最盛时期,由于侵蚀基准面的上升,平原排水不畅,引起沼泽化现象,导致在漫滩低地上有一期普遍的淤泥沉积,造成了全新统地层一统三分的构造剖面,如图 1-1 所示。沉积厚约 20m,上陆相层 0~9.4m、下陆相层 17.75~22.99m 为粉土,亚砂土夹亚黏土,中间为 9.14~17.75m 的海相黑灰色淤泥层。岩相古地理如图 1-2 所示。

进入人类历史时期,黄河为人工堤约束,成为地上悬河。1855 年后夺大清河入海,在利津以东塑造了今日的黄河三角洲。地貌上岗洼相间,呈垄状起伏。岸线以上区域,以微斜平地 and 滨海滩地为主,次为河滩地和河滩高地。泥沙表现为“高沙、洼淤、干胶泥(壤)”的一般规律。无论是垂直剖面还是水平方向上,均由粉土、粉土夹薄层黏土地层组成。沿东营胜利黄河大桥—东营港方向 60km 范围内的取样地点、取样地点土层剖面分别如图 1-3、图 1-4 所示。

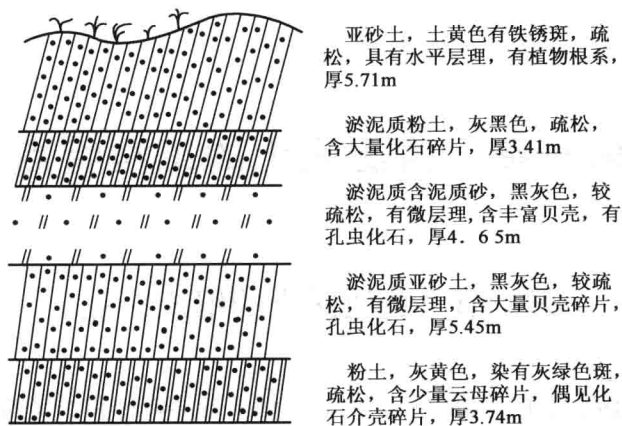


图 1-1 沾化县下河李村处全新世(Q_4)剖面

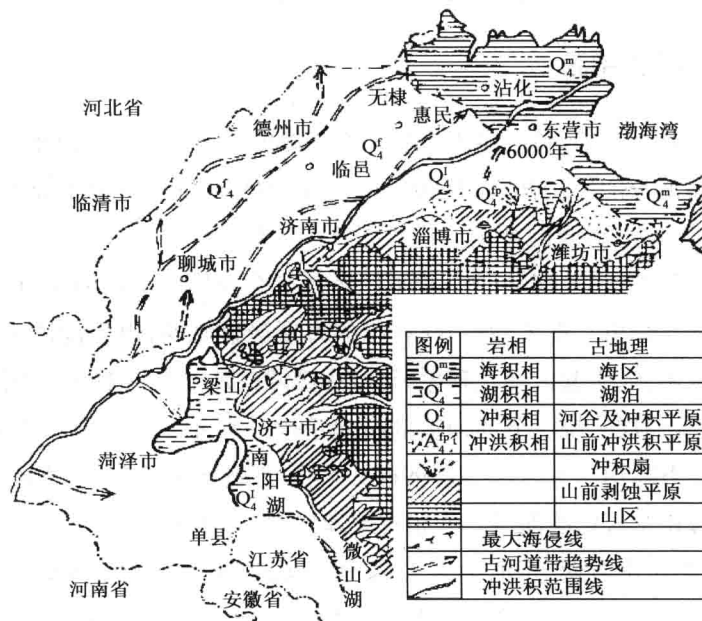


图 1-2 山东省平原区全新世岩相古地理图

从土层剖面看,在取土深度内,0~28.5cm 深内为表层土,28.5~40cm 深内为含黏土矿物稍高的粉土,向下夹有 20~25cm 厚的不易粉碎的暗褐色黏土层,再向下为浅土黄色粉土,粉粒含量 >96%,只在局部洼坑地带如傅家窝沉积了粉

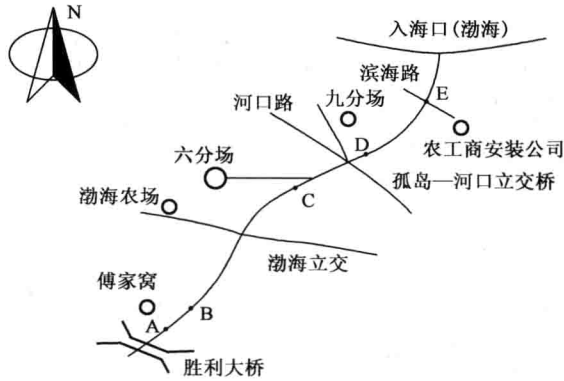


图 1-3 取样地点示意图

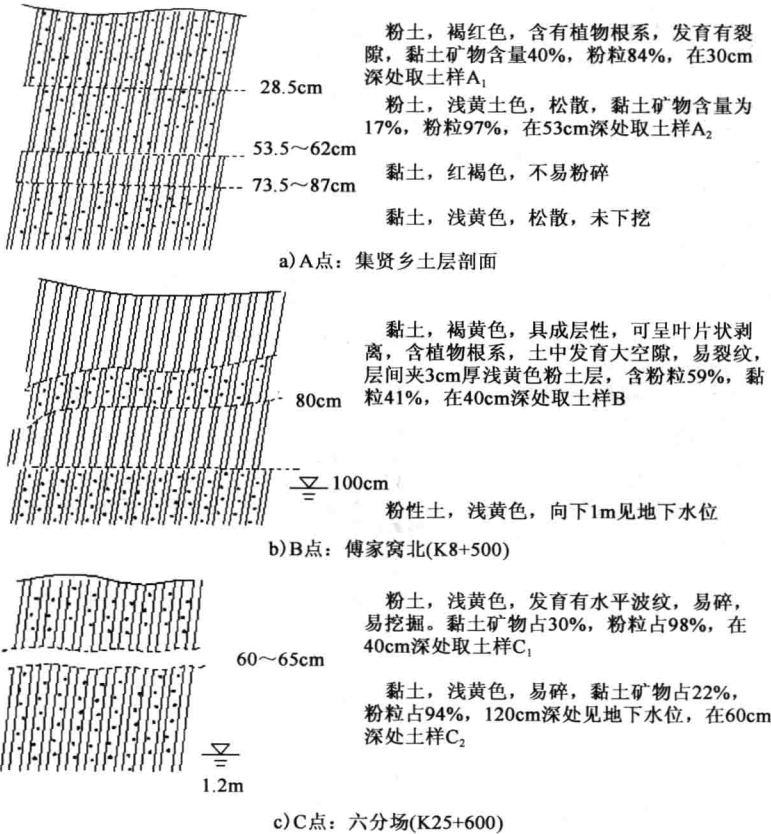


图 1-4

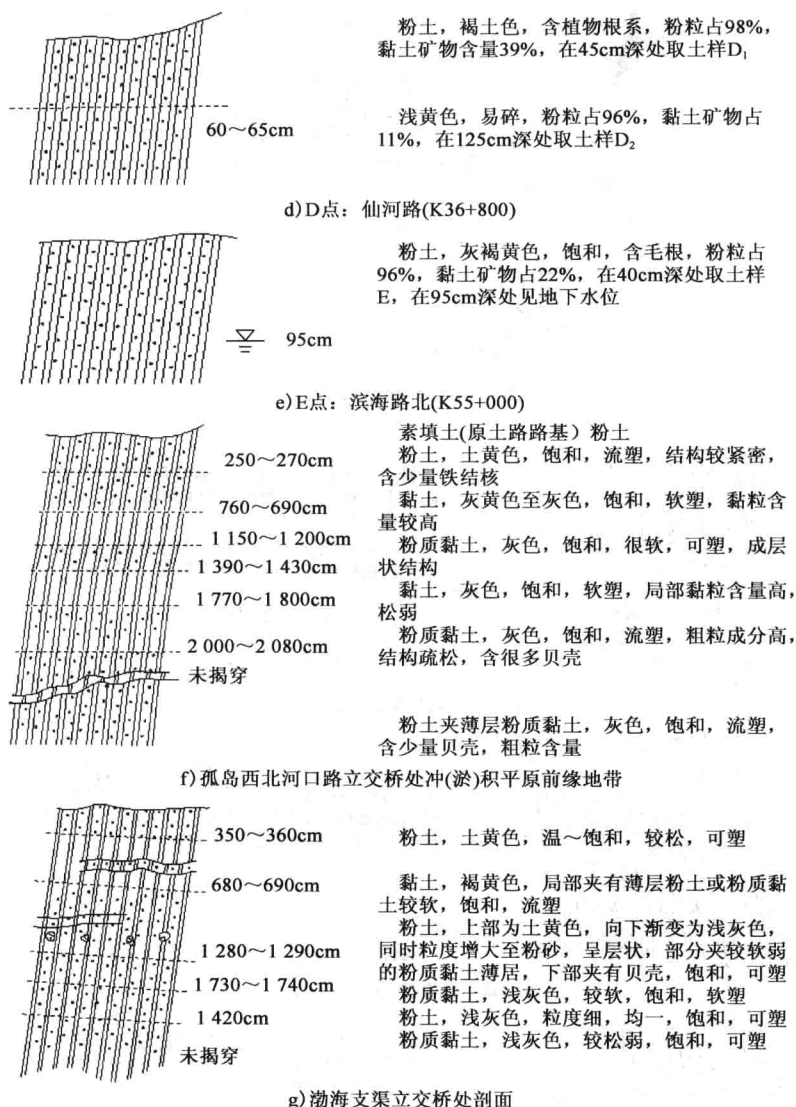


图 1-4 取样地点土层剖面图

质黏土层。上、下两层粉土的粉粒和黏土矿物含量如图 1-5 所示。从颜色上看, 以褐土黄色、浅土黄色为主, 这是由于含大量石英、长石、伊利石、云母类原主浅色矿物造成的, 褐土红色则是未水化的氧化铁染成的。

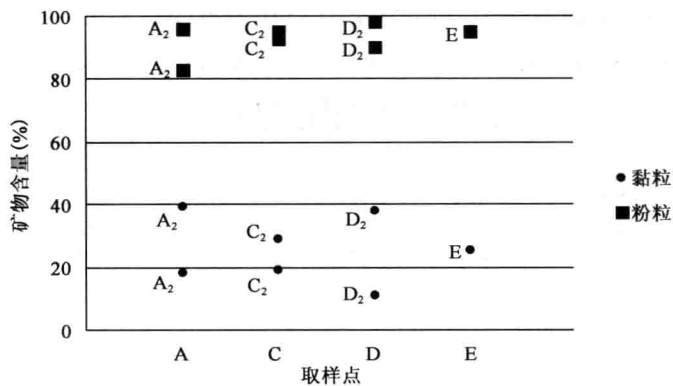


图 1-5 采样点粉粒和黏土矿物含量分布图

二、土的主要物质组成

土的沉积相环境(物源气候、地下水运动状况、海水侧渗、顶托作用等)决定了土的化学成分、含盐量和盐分的特征。这些特征直接影响着土的改性稳定问题。

1. 气候

黄泛区属暖温带季风区。春旱,夏涝,晚秋又旱。对于沿海区域,由于海水的侧渗、顶托作用,土壤盐渍化严重。以东营市为例,气候、温度、湿润系数 k 、盐分变化见表 1-1。

东营市气候、温度、湿润系数 k 、盐分变化 表 1-1

月份	2~5 月	6 月	7~8 月	9~11 月	12~2 月
温度	-1~22℃	18~28℃	23~30℃	13℃	干燥寒冷最低-10℃
湿润系数 k		0.3	1.8	0.2~0.5	
盐分变化	土壤盐分上行、强烈蒸发、积盐	夏季相对稳定	雨季淋浴脱盐,下行为主	秋季蒸发,积盐	相对稳定

2. 地下水矿化类型及土中的盐分

地下水矿化度及盐土特征见表 1-2。如表所示,盐土的盐分在黄河以北平原西部以硫酸盐为主,向东盐分中的氯化物逐渐增多,至滨州地区以氯化物为主,再往东与三角洲滨海盐土相接。而滨海区又分为滨海盐土和滨海潮土两类。

滨海盐土分布于地面高程 3.5m 以上地区, pH 值范围是 7.2 ~ 8.5, 有机质含量平均 0.78 ~ 0.83。盐分以氯化钠为主, Cl^- 占阴离子总量的 80% ~ 90%; 阳离子

地下水、矿化度及盐土特征

表 1-2

地区	地 下 水			盐土分布面积及类型		
	埋深 (m)	矿化度 (g/L)	占地面积 (%)	氯化物盐土 (亩) ^①	硫酸盐氯化物(亩)	氯化物硫酸盐(亩)
菏泽	<1	<0.5	2.29	44 238	0	0
	1~2	0.5~2	92.6			
	2~3	2~5	4.87			
	3~5	5~10	0.22			
	>5	>10	0.003			
聊城	<1	<0.5	7.85	38 121	64 652	123 679
	1~2	0.5~2	75.36			
	2~3	2~5	16.04			
	3~5	5~10	0.75			
	>5	>10				
德州	<1	<0.5	2.95	0	0	397 930
	1~2	0.5~2	74.57			
	2~3	2~5	21.57			
	3~5	5~10	0.95			
	>5	>10	0.02			
滨州	<1	<0.5	0.28	391 892	8 240	0
	1~2	0.5~2	43.73			
	2~3	2~5	31.17			
	3~5	5~10	6.26			
	>5	>10	12.70			
东营	<1	<10.5	2.5	海土 滨盐 海土 滨潮		
	1~2	0.5~2	12.21			
	2~3	2~5	18.87			
	3~5	5~10	14.18			
	>5	>10	52.24			

①1 亩 = 666.66m²。

以 Na^+ 、 K^+ 为主, Na^+ 占阳离子总量的 70% ~ 80%; Na^+ 、 Mg^+ 、 Ca^{2+} 离子含量的比例为 7:2:1。潜水埋深 2 ~ 3m。矿化度 $> 3\text{g/L}$, 最高可达 46.7g/L 。滨海滩涂盐土布于地面高程小于 3.5m 以下地区, 黄河泥沙沉积后, 又经海潮多次浸渍而成。土壤盐分以氯化物为主, $\text{Cl}^- + \text{Na}^+$ 占含盐量的 80% 以上。潜水埋深 1.3 ~ 1.5m, 矿化度 $> 50\text{g/L}$ 。

地下水矿化类型随潜水的埋深而变化。埋深 $> 3\text{m}$, 矿化类型为以 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 、 HCO_2^- — SO_4^{2-} — Na^+ 、 HCO_2^- — Cl^- — Na^+ 为主, Cl^- — HCO_2^- — Na^+ 次之。埋深 2 ~ 3m, Cl^- — HCO_2^- — Na^+ 为主, Cl^- — Na^+ — Mg^{2+} 次之。埋深 1.5 ~ 1.3m, Cl^- — HCO_2^- — Na^+ 型次之, 属氯化物钠型、氯化物钠镁型。

3. 土的主要化学成分和矿物组成

对东营胜利黄河大桥—东营港方向 60km 范围内土样进行成分分析, 结果见表 1-3 和表 1-4。化学成分的特点是高硅(Si)、铝(Al), 次为钙(Ca)。钾、钠($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$)含量较少, 硅铝率高。pH 值范围是 7.1 ~ 8.6, 平均为 7.7。水溶盐以 Cl^- 和 Na^+ 为主, 属氯盐碱性土。

黄泛区粉土的化学成分表

表 1-3

土样 编号	有机质	烧失量	pH	FeO^+	AlO	CaO	MgO	SiO	SiO^+	TiO^+	K_2O	Na_2O
A ₁	1.37	10.74	7.5	4.91	13.15	12.51	5.99	51.08	3.88	6.45	2.06	1.88
A ₂	0.55	5.92	7.1	3.49	12.42	9.57	2.54	66.97	5.39	1.80	1.90	2.02
B	1.33	13.81	8.4	6.05	15.50	12.69	4.03	50.02	3.23	1.89		
C ₁	0.74	6.98	8.6	3.96	13.75	10.87	4.8	56.8	4.12	4.03	1.82	1.90
C ₂	0.55	6.72	7.1	3.39	10.49	5.6	1.84	66.64	6.35	0.804	2.07	1.85
D ₁	1.27	10.19	7.5	5.32	12.27	11.44	3.44	54.86	4.47	5.63	2.18	1.62
D ₂	0.75	6.77	7.9	3.65	9.83	9.11	3.08	63.95	6.51	5.50	1.92	2.02
E	0.57	6.03	8.2	3.62	12.12	7.10	4.88	67.87	5.60		1.95	2.18

注: 采用 X 射线衍射和硅酸盐化学分析法综合测得。

矿物成分的特点是: 非黏土矿物含量占 74%, 最高达 89%, 主要有石英、长石、碳酸盐矿物、云母及重矿物, 微量角闪石。与黄土高原及黄河中游第四系沉积地层相比, 碳酸盐矿物含量较丰富。以 CaCO_3 为主, 最高为 15%, 平均

11.14%。碳酸盐含量高的原因,一方面,是黄土高原第四系沉积物中含有丰富的碳酸盐矿物,另一方面,是黄河三角洲地区降雨量小,蒸发量大,在表层沉积物沉积过程中,受到海水顶托、侧渗以及高矿化度地下水作用,含 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 的溶液在近地表部位由于蒸发而浓缩,形成泥晶方解石沉淀,同时降低了地下水中 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 的含量。此外,干旱气候下,通过毛细管蒸发、浓缩作用,下伏含盐量高的滨海冲(淤)泥质沉积物中,盐分含量上升,使表层黄河冲(淤)积物盐碱化,形成碳酸盐及其他盐类矿物,使碳酸盐矿物含量增高。

黄泛区粉土的矿物成分表

表 1-4

矿物大类	非黏土矿物含量(%)							黏土矿物相对含量(%)			
矿物名称	总量	石英	长石	云母	方解石	白云石	角闪石	蒙脱石	伊利石	高岭石	绿泥石
A ₁	60	20	20	10	7	3	微	28	49	10	13
A ₂	83	30	25	10	10	5	3	27	52	9	12
C ₁	70	30	20	10	7	3	微	26	53	9	12
C ₂	78	28	30	10	7	3	微	28	50	10	13
D ₁	61	21	20	10	10		微	24	53	10	13
D ₂	89	33	30	10	10	3	3	28	52	9	11
E	78	33	25	10	7	3	微	29	50	7	11

注:采用 X 射线衍射测得。

黏土矿物含量低,平均占 26%,最低占 11%。以伊利石、蒙脱石为主,两者平均含量占黏土矿物含量的 79%,最高达 84%。纯伊利石占总量的 51%,次为绿泥石和高岭石。伊利石含量继承了黄河中游地区黄土中的黏土矿物特征,而蒙脱石含量高则是因三角洲陆相沉积物沉积过程中受海洋顶托、侧渗作用,沉积物间隙水富含 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等离子,在碱性环境下, Ca^{2+} 和 HCO_3^- 易结合成 CaCO_3 沉淀, Mg^{2+} 则易替代伊利石和高岭石晶格中的 Al^{3+} ,而形成蒙脱石。由绿泥石的能谱分析谱图(图 1-6)可见,铁峰十分明显,它是贫氧富铁的滨海沉积环境里形成的“鲕绿泥石”。

上述黏土矿物属层状结构的硅酸盐矿物。

土的可稳定性取决于土中黏土矿物的含量和种类,不同的黏土矿物,结构不

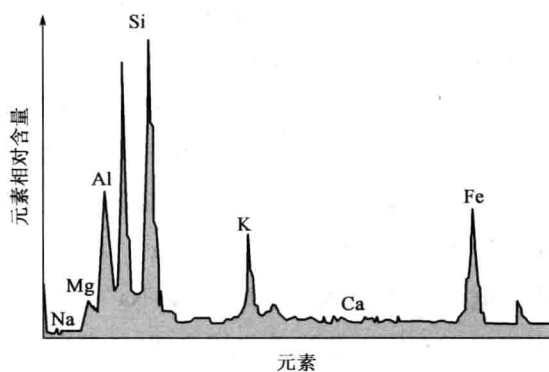


图 1-6 东营胜利大桥处土中绿泥石的分析谱图

同,则具有不同的胶体吸附作用和阳离子交换能力。上述黏土矿物属层状结构,如图 1-7 所示。

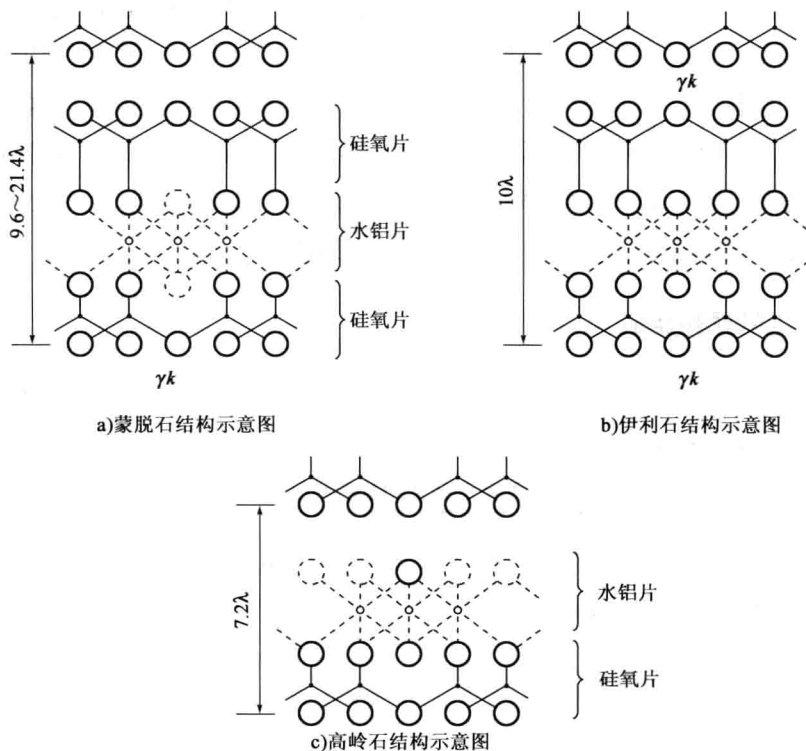


图 1-7 硅酸盐黏土矿物的层状结构

伊利石矿物的硅氧片中,硅约有 15% 被铝离子所置换,剩余较多的净负电荷, K^+ 便被强烈地吸附在晶层之间半陷在硅氧片的六角形晶穴内,起着键桥一样的作用,把两边的晶层连接起来,阻止了晶体的膨胀,属非胀缩性矿物。蒙脱石类矿物,与晶层底面相平行的两个基面都是 Si—O 层构成,两面都是氧离子通过“氧键”联系,为分子引力,键力弱。一方面它能进行强烈的同晶置换,即除 Si^{4+} 可被 Al^{3+} 替换外,八面体中 Al^{3+} 常被 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 以及 Zn^{2+} 等代替,使八面体片上出现多余的净负电荷,可吸附大量阳离子(如 Na^+ 、 Ca^{2+} 等),阳离子吸引极性水分子而成为水化离子充填于结构单位层之间,使蒙脱石晶格活性很大。在层间除能进入交换阳离子和吸附大量水分子外,同时也能进入有机液体,因此,它具有强的吸湿性,易吸水膨胀,具大的压缩性,高的阳离子吸附性。高岭石类矿物,由一层硅氧片和一层水铝片相迭合而成,两晶片重叠时,相邻的两表面,一方由水铝片上的氢氧群构成,而另一方则由硅氧片上的氧构成,两晶层产生了氢氧键连接。连接力较强,吸湿性弱,不易膨胀。“鲕绿泥石”晶体结构中,部分硅被 Al^{3+} 代替, Al^{3+} 又可被 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 替代,存在大量多余净负电荷。这些黏土矿物呈薄片状的小结晶颗粒,都具有大的比表面,有很强的胶体和阳离子吸附能力。正是由于该类土中含大量的原生砂粒矿物、少量的黏土矿物,且黏土矿物以伊利石为主,蒙脱石次之,因此单纯的石灰稳定效果差。

三、土的颗粒组成

对东营胜利黄河大桥—东营港方向 60km 范围内土样进行颗粒分析试验,试验结果见表 1-5 和图 1-8。

东营黄泛区土的颗粒特征

表 1-5

土样 编号	土粒组成(%)					限制 粒径 d_{60}	有效 粒径 d_{10}	d_{30}	不均匀 系数 C_u	曲率 系数 C_c
	0.25 ~ 0.074	0.074 ~ 0.05	0.05 ~ 0.005	0.005 ~ 0.002	<0.002					
A ₁	0	10	75	8	7	0.016	0.002 5	0.011	6.4	3.025
A ₂	0	12	85	1	2	0.027 5	0.013	0.025	2.1	1.7
B	0	0	59	21	20	0.044		0.034		
C ₁	0	3	92	2	3	0.019	0.009	0.017 5	2.1	1.79