

半刚性路面 材料结构与性能

BANGANGXING LUMIAN CAILIAO JIEGOU YU XINGNENG

沙爱民 著

人民交通出版社

Bangangxing Lumian Cailiao Jiegou yu Xingneng

半刚性路面材料结构与性能

沙爱民 著

中国博士后科学基金 资助项目
国家教委留学回国人员科研基金

半刚性路面材料结构与性能

沙爱民 著

责任印制:孙树田 插图设计:高静芳 责任校对:王淑琴

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街10号)

各地新华书店经销

北京牛山世兴印刷厂印刷

开本:850×1168 $\frac{1}{32}$ 印张:4.375 字数:107千

1998年4月 第1版

1998年4月 第1版 第1次印刷

印数:0001-4000册 定价:13.80元

ISBN 7-114-03008-8

U·02158

前 言

以水泥、石灰为主的稳定类材料,目前在我国广泛地用做高等公路路面基层或底基层。这类半刚性路面材料不仅能满足作为路面结构承重层的基本要求,而且以当地土石料和工业废料为主要原料,成型工艺也相对简单,因而,具有明显的技术、经济优势。

认识材料的组成和性质是充分利用现有材料和探索使用新型材料的基础。从结构与性能角度研究解决半刚性路面材料工程设计与施工实践中引出的问题,如减少半刚性路面的收缩开裂、提高其早期强度、评定其疲劳及动态特性,并探索新型半刚性材料,将有助于更加有效地利用和发挥半刚性路面的功能。这也是作者孜孜追求的目标。

笔者十二年来在半刚性路面材料领域潜心研究,本书正是在汇集上述研究成果的基础上撰写而成。其中包括了作者主持完成的中国博士后科学基金项目、国家教委留学回国人员科研基金项目以及交通部、陕西省重点科研项目的有关研究成果。

借本书出版之际,谨向在本书所涉及研究工作的进行以及书稿出版过程中提供帮助的有关单位及个人表示感谢,尤其要感谢张登良教授多年来在学术上给予的众多指导和鼓励,同时也向我的夫人孙朝云硕士在我长期的科研工作中表现出的理解和支持以及在书稿整理过程中付出的辛劳致以谢意。

限于水平和能力,书中疏漏和错误在所难免,恳请读者批评指正。

沙爱民

1998年3月于西安公路交通大学

内 容 提 要

本书从半刚性路面材料组成及其相互作用等方面,较系统地阐述了半刚性路面材料的强度、变形等路用性能机理,对减少半刚性路面的收缩开裂、提高其早期强度、评定其疲劳及动态特性等都进行了有益的研究和探索。

本书可供道路工程技术人员及有关的大中专院校学生学习参考。

目 录

第一章 稳定土液相介质特性及作用	1
1.1 概述	1
1.2 土溶液的基本组成	2
1.3 硅、铝物质的溶解及其离子形态	3
1.3.1 硅、铝物质的溶解	3
1.3.2 硅、铝物质的离子形态	4
1.4 稳定土酸碱性来源	7
1.4.1 土	7
1.4.2 添加剂	8
1.5 稳定土酸碱性变化	8
1.5.1 土的缓冲作用	8
1.5.2 稳定土 pH 值变化	10
1.6 稳定土酸碱性的意义.....	11
1.6.1 介质酸碱性及硅、铝物质的溶解度及离子形态的关系.....	11
1.6.2 介质酸碱性及稳定土凝结硬化作用.....	12
1.7 结论.....	12
1.8 参考文献.....	13
第二章 稳定土强度形成反应热力学	15
2.1 概述.....	15
2.2 火山灰反应生成物.....	15
2.3 稳定土火山灰反应热力学原理.....	16

2.4	热力学在稳定土强度形成和发展中的应用	19
2.4.1	最佳剂量	19
2.4.2	常压下高温快速养生	19
2.4.3	低温养生的可行性	21
2.5	结论	22
2.6	参考文献	22
第三章	石灰粉煤灰稳定土早强技术	24
3.1	概述	24
3.1.1	国内外研究现状	24
3.1.2	化学添加剂早强方法的意义	26
3.2	化学添加剂提高石灰粉煤灰稳定土早期强度的理论基础	27
3.2.1	石灰粉煤灰稳定土强度形成原理	27
3.2.2	化学添加剂提高石灰粉煤灰稳定土早期强度的技术路线	32
3.3	早强剂的试验与选取	33
3.3.1	化学添加剂早强效应的探索	33
3.3.2	早强剂的适宜剂量	34
3.4	早强石灰粉煤灰稳定土的路用性能	36
3.4.1	常温及低温养生条件下的强度发展规律	36
3.4.2	抗弯拉与抗裂性能	37
3.4.3	冻稳性	37
3.5	工艺对稳定土早强效果的影响	39
3.6	早强机理	40
3.6.1	剩余活性 CaO 含量与酸碱度 pH 值分析	41
3.6.2	红外光谱分析	42
3.6.3	X 射线衍射分析	43
3.6.4	差热分析	44

3.6.5 微观结构分析·····	44
3.7 结论·····	47
3.8 参考文献·····	48
第四章 掺有硫酸钠石灰类稳定土的强度与体积变化 ·····	50
4.1 概述·····	50
4.2 试验原材料及混合料组成·····	51
4.2.1 原材料品质·····	51
4.2.2 混合料组成·····	52
4.3 试验方案·····	52
4.4 掺加硫酸钠的石灰类稳定土的强度变化·····	52
4.4.1 混合料组成及外掺剂掺量影响·····	52
4.4.2 养生温度影响·····	54
4.4.3 闷料时间影响·····	54
4.5 掺加硫酸钠的石灰类稳定土的体积变化·····	57
4.5.1 混合料组成及外掺剂掺量影响·····	57
4.5.2 闷料时间影响·····	60
4.6 掺加硫酸钠的石灰类稳定土强度与体积变化 机理分析·····	60
4.7 结论·····	62
4.8 参考文献·····	62
第五章 稳定粒料基层的抗裂性 ·····	63
5.1 概述·····	63
5.2 温度收缩系数测试方法·····	64
5.2.1 电路设计与分析·····	64
5.2.2 测试与计算·····	66
5.2.3 测试误差分析及修正·····	66
5.3 试验原材料、混合料及试验方法·····	68
5.4 不同砂砾含量条件下材料的抗裂性能·····	69

5.4.1	强度与刚度	69
5.4.2	温度收缩系数	69
5.4.3	抗裂性	71
5.4.4	综合分析	72
5.5	不同二灰比条件下材料的抗裂性能	73
5.5.1	强度与刚度	73
5.5.2	温度收缩系数	74
5.5.3	抗裂性	75
5.5.4	综合分析	76
5.6	结论	76
5.7	参考文献	77
第六章	稳定级配砂砾类材料的疲劳特性	78
6.1	概述	78
6.2	疲劳试验方法	78
6.3	试验材料和条件	80
6.4	应力疲劳方程	82
6.5	重复加载过程中应变的变化规律	84
6.6	重复加载过程中动弹模量的变化规律	88
6.7	结论	90
6.8	参考文献	91
第七章	稳定土材料动态性能	92
7.1	概述	92
7.2	行车荷载的动态作用模式	93
7.3	路面材料动态性能室内评价内容	94
7.4	路面材料动态参数测定方法	94
7.4.1	重复压缩试验	95
7.4.2	循环单剪试验	95
7.4.3	共振柱试验	96

7.5	不同试验条件下路面材料的力学特征分析	96
7.6	动态模量的定义	98
7.7	水泥稳定土动态模量的试验测定	99
7.8	水泥稳定土动态模量的拟合	101
7.8.1	线性模型	101
7.8.2	曲线模型	102
7.9	水泥稳定土动态模量影响因素的试验分析	104
7.9.1	应力幅值	104
7.9.2	作用频率	105
7.9.3	间歇时间	105
7.9.4	循环作用次数	106
7.10	结论	107
7.11	参考文献	107
第八章	半刚性面层材料试验探索	109
8.1	概述	109
8.2	水泥—乳化沥青复合结合料	110
8.2.1	试验原材料及方法	110
8.2.2	试验结果与分析	111
8.3	水泥—乳化沥青混凝土	116
8.3.1	试验原材料及方法	116
8.3.2	试验结果与分析	117
8.4	结语	119
8.5	参考文献	120
	英文目录	121

第一章 稳定土液相介质特性及作用

1.1 概 述

同土等细颗粒材料压实成型后的相组成情况一样,掺加结合料的稳定土通常亦由固相土颗粒、液相土溶液以及气相空气三相组成。土中固、液两相相互作用:土的矿物组成影响着土溶液的组成,土溶液的组成反过来也影响着土中原有矿物质的稳定性及新矿物质的形成。

酸碱性是物质的属性之一,也是土溶液的基本特性。粘土矿物作为固体酸早在 20 世纪以前就已经有人对其作过研究^[1]。土中存在着各种酸碱物质,稳定土结合料通常采用强碱性无机化合物。土与结合料之间的相互作用以及生成物的发生、发展都要受到其酸碱性的制约^[2]。酸碱性是道路稳定土一项重要的物理化学性质指标。

应当指出,从微观角度看,土与稳定土都是不均匀体系,其酸碱性指标即 pH 值通常是在一定的水土比条件下用电极测定。严格地讲, pH 值的大小反映了电极表面及其周围局部溶液中氢离子的活度。这种氢离子活度与双电层以及自由溶液中的氢离子活度是有差异的,因而,所测得的 pH 值实际上是一个表观值。再者,化学上的 pH 值是以氢离子在溶液中均匀分布为前提的。对于土-水胶体体系来说,土颗粒比分子要大的多,氢离子不是均匀分布在溶液中的。尽管如此,上述差异不致改变稳定土酸碱性的基本特性和影响。

1.2 土溶液的基本组成

土溶液是一种胶体，它主要由可溶性无机盐类、可溶性有机物以及粘土颗粒和粗分散物质组成。可溶性无机盐类是由 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 等离子组成的可溶性盐，以及溶解度较小的 Al^{3+} 、 Fe^{3+} 、 Mn^{2+} 等的硅酸盐、碳酸盐、磷酸盐等组成。土溶液和这些可溶性盐类有溶解—沉淀的平衡关系。可溶性有机物包括糖类、有机酸等可溶性低的分子化合物、腐殖质等大分子化合物以及一些有机络合物和螯合物。粘土矿物、非晶质物质以及微细的有机残体也可以分散在土溶液中。

土溶液中离子种类和含量随成土母岩、成土过程以及土的性质不同而变化。一般地，土中阳离子以 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 为主， Al^{3+} 、 Mn^{2+} 等次之。 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量是 $(3\sim 10) \times 10^{-3} \text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ， K^+ 、 Na^+ 约为 $10^{-4} \text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \sim 10^{-3} \text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ， Al^{3+} 、 Mn^{2+} 含量一般为 $2 \times 10^{-4} \text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。阴离子中以 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 NO_3^- 为主，含量变化幅度约为 $(1\sim 10) \times 10^{-3} \text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ，其余阴离子一般在 $10^{-5} \text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \sim 10^{-6} \text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下^[3]。

稳定土溶液中离子的有效浓度要受到土中含水量的影响。稳定土中水分的多少取决于成型含水量和环境湿度大小，视稳定土的组成情况，稳定土中水的体积可以在一个较宽的范围内（10%~30%）变动。土中含水量大，土溶液可视为稀溶液（电解质浓度小于 $0.01 \text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ）；土中含水量减到一定程度（电解质浓度大于 $0.1 \text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ），离子间相互作用加强，则要考虑离子实际有效浓度。多价离子的浓度受含水量影响更大。

溶液中化学反应涉及的是离子的具体形式，因而，土溶液中各种元素离子形态较之于土溶液的离子组成更为重要。在土溶液中，离子视条件能够以离子对、络合离子以及多种多样的水合离

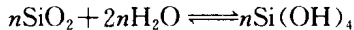
子形态存在。

1.3 硅、铝物质的溶解及其离子形态

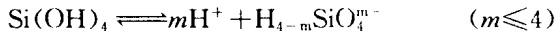
1.3.1 硅、铝物质的溶解

土溶液中硅、铝组分与稳定土的硬化反应有关，因而成为稳定土化学作用研究的焦点。

土溶液中硅成分主要来源于石英、非晶质氧化硅以及层状硅酸盐等的溶解。石英及非晶质氧化硅在水中的溶解机制在于 $\equiv\text{Si}-\text{O}-\text{Si}\equiv$ 型的氧化硅链的解聚和水解，并产生 $\equiv\text{Si}-\text{OH}$ 基团，最终形成硅酸单体 $\text{Si}(\text{OH})_4$ ，即：



并且随介质 pH 值的不同，或处于水化形态，或处于不同离解程度的水解形态，即：



土中铝、铁、镁硅酸盐中硅的溶解主要与水合氢离子 H_3O^+ 在硅酸盐晶体中的置换、破坏作用有关。水合氢离子 H^+ 深入到矿物晶格中，置取代 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^+ 、 Mg^+ ，引起晶格荷电状态变化，并逐渐破坏晶格，使阳离子以及含硅和铝的阴离子转移到溶液中。水四面体结构与硅氧四面体结构相似，大小相近。水四面体置换硅氧四面体，引起硅酸盐矿物晶格破坏、崩解，也是可能的机制之一。

硅在土溶液中的溶解度与矿物构造、溶液酸碱性和温度密切相关。相同条件下，非晶质二氧化硅的溶解度在 $\text{pH}=8$ 左右开始随 pH 值升高而增大，在 $\text{pH}>10$ 时急剧增大。土中破碎二氧化硅晶体表面有一薄层的无定形二氧化硅。二氧化硅粒径减小到一定程度（小于 $0.5\mu\text{m}$ ），其晶格趋向于混乱状态。这体现着晶质、非晶质二氧化硅的联系与转化。晶质、非晶质二氧化硅的溶解度随温度升高而增加。铝、铁、镁硅酸盐的溶解与 pH 值呈非单调变化

关系,在 $\text{pH}=8\sim 10$ 时具有最小的溶解度。在酸性介质中,水合氢离子 H_3O^+ 活度高,容易将铝硅酸盐矿物中铝溶解,使矿物解体,释放出硅;随着 pH 值增高, H_3O^+ 活度降低,硅的释放量降低;介质 pH 值进一步上升到呈碱性时,一方面由于 OH^- 活度升高,有利于铝酸盐生成,矿物溶解度增加,另一方面溶解生成的 H_4SiO_4 单体在碱性介质中解离,有助于矿物水解反应的进行,硅的释放量又得以增大。对于铁、镁硅酸盐,溶解机制不同的是:在碱性介质中,硅的释放程度增大主要是 H_4SiO_4 的解离引起的^[4]。

硅在溶液中的溶解度除受上述矿物的构造组成、介质 pH 值、温度影响外,还受到与矿物的普遍溶解控制因素如矿物的表面、扩散作用等的约束。在稳定土中溶解性硅含量的提高可以通过增大液相介质的碱性或提高液相介质的酸性两种互不相容的途径达到。强碱介质中不同构造的含硅矿物都容易溶解,并且强碱介质也有利于稳定土火山灰反应产物的结晶硬化,再者也容易实现。因此促进形成碱性的液相介质是稳定土的基本途径。

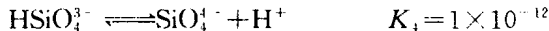
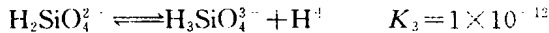
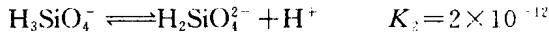
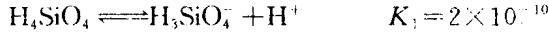
土溶液中铝主要来源于硅酸铝的溶解或酸性土中氧化铝的溶解。这些含铝矿物的溶解机制是它们在水合 H_3O^{3+} 的作用下分解,铝被释放出来进入溶液中。

铝以 Al_2O_3 计算在一般土中的含量约为 $2\%\sim 12\%$,仅次于氧和硅,并随土的风化程度加深而增加。但是土中铝化合物溶解度很小,因而土溶液中铝的含量并不高,一般小于 1mg/L (硅的含量一般是 $1\text{mg/L}\sim 100\text{mg/L}$),因而稳定土中火山在反应产物以硅酸盐为主。无论是铝的氢氧化物还是硅酸铝,其溶解度随介质 pH 值变化均近呈凹形曲线。

1.3.2 硅、铝物质的离子形态

硅酸在常温下是一种很弱的酸,硅酸离解成离子的离解度甚微,并随 pH 值升高而增大。 30C 时硅酸单体的各级解离常数如

下:



进一步得出不同 pH 值条件下各种形态硅酸根离子的含量计算值的变化规律 (图 1-1), 由图示结果可看出, $\text{pH} < 8$ 时, 溶液中仅以 H_4SiO_4 存在; 而当 $\text{pH} > 13$ 时, 溶液又仅以 SiO_3^{2-} 离子存在。在稳定土 pH 值范围内有多种硅酸根离子存在。

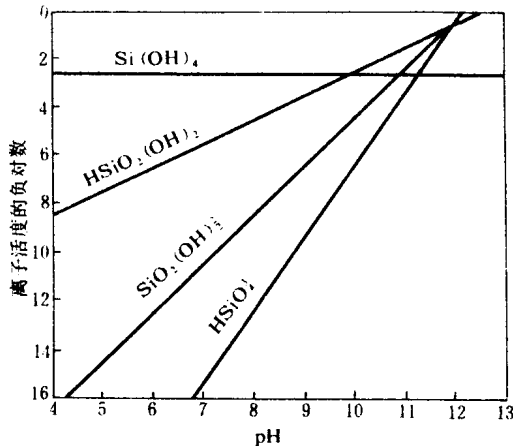


图 1-1 硅离子活度与 pH 值关系 (与无定形氧化硅平衡)

硅酸根离子与多价金属离子相似, 趋向生成多核化合物, 如:



石英及无定形硅溶解时, 在中性或弱酸性条件下只生成单体硅酸, 但在碱性条件下除了形成单体硅酸外, 同时还有多聚体硅生成, 但硅的溶解度不会因此而发生显著变化。硅在 $\text{pH} = 10 \sim 13$ 范

围内以多种形态存在,这势必带来稳定土火山灰反应产物中硅酸盐类别的多样化^[2]。

土溶液中,铝离子水化与水结合成比较牢固的六配位形态—— $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$,并能水解释放出 H^+ ,形成一系列的单体水解离子: $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$ 、 $\text{Al}(\text{OH})(\text{H}_2\text{O})_5^{2+}$ 、 $\text{Al}(\text{OH})_2(\text{H}_2\text{O})_4^+$ 、 $\text{Al}(\text{OH})_3(\text{H}_2\text{O})_3^0$ 。

随着介质 pH 值的变化,各种单体水解铝离子的分布不同(图 1-2)。在 $\text{pH} < 5$ 以下以 $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$ 为主; $\text{pH} = 5 \sim 8$ 时分别以 $\text{Al}(\text{OH})_3(\text{H}_2\text{O})_3^0$ 、 $\text{Al}(\text{OH})_2(\text{H}_2\text{O})_4^+$ 和 $\text{Al}(\text{OH})_4(\text{H}_2\text{O})_2^-$ 为主; $\text{pH} > 8$ 的条件下则主要以 $\text{Al}(\text{OH})_4(\text{H}_2\text{O})_2^-$ 为主。从 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 水解的角度来说,即在 $\text{pH} > 8$ 以上,以 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 酸式解为主。

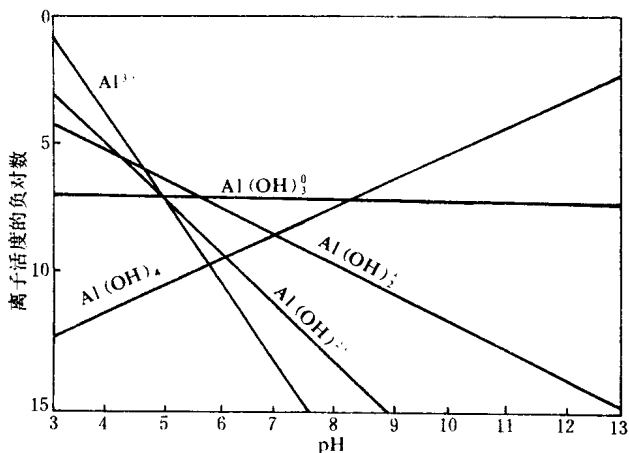


图 1-2 铝离子活度与 pH 值关系 (与三水铝石平衡)

土溶液中除了有单体铝的水解离子,还有很多的铝聚合物。土溶液中的铝离子很容易聚合成一体,有碱存在时更易聚合,这使得稳定土过程中铝酸盐以及含铝硅酸盐产物增多。

1.4 稳定土酸碱性来源

1.4.1 土

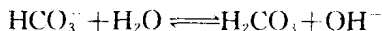
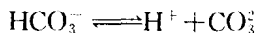
除了少量的可溶性酸以外，粘土矿物是大多数土质酸的主要载体。土中酸的诸多产生机制中，以粘土胶体表面产生的酸的数量和形式最多。氢离子与铝离子吸附是土质酸性的主要表现形式。粘土胶体表面在溶液中解离出 H^+ 而成为酸；在粘土胶体表面吸附的铝离子与土溶液反应产生 H^+ 而使其呈酸性。

硅氧四面体和铝氧八面体因同晶置换所产生的负电荷吸附氢离子或铝离子以求平衡，从而呈酸性；硅酸盐晶体边面上与硅或铝相连接的 OH 基团在一定条件下可电离出质子，表现出酸性；游离氧化铁、铝为平衡表面剩余价键力而在水溶液中羟基化，在一定介质条件下，其表面的配位水合基离解出质子，因而具有酸的行为。

碱式盐是土中碱的主要来源。土中碱式盐以碳酸盐 Na_2CO_3 、 $NaHCO_3$ 、 $CaCO_3$ 、 $Ca(HCO_3)_2$ 等为主。含碳酸钙的黄土，其 pH 值是由碳酸钙的水解所决定的。 CO_3^{2-} 与 H^+ 结合，促使 H_2O 解离，从而土溶液中 OH^- 含量增加：



若为重碳酸盐，则 HCO_3^- 既能解离出 H^+ ，使土溶液呈酸性；又能和 H^+ 结合，促进 H_2O 解离，使溶液的 OH^- 增加，起碱的作用：



其中后一平衡的解离常数远大于前一平衡的解离常数，也即 OH^- 浓度远大于 H^+ ，因而溶液呈碱性。

土是多相体系，气相中 CO_2 的分压通过影响 HCO_3^- 的化学平