

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2022.04.023

含泥质石膏岩中桥梁桩基耐久性设计

罗宇, 贾鹏

(深圳市市政设计研究院有限公司, 广东 深圳 518000)

摘要: 结合成都某工程, 对该地区出现的含泥质石膏岩对混凝土的腐蚀机理进行分析, 进一步对该地层中的桥梁桩基耐久性设计提出解决方案和建议措施, 并通过实验验证, 为成都等出现含泥质石膏岩地区其他桩基工程提供了有益的参考。

关键词: 桥梁桩基设计; 石膏岩; 硫酸盐侵蚀

中图分类号: U443.15

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2022)04-0081-04

0 引言

随着城市建设的不断深入, 高层建筑和大型桥梁建设的越来越多, 含泥质石膏岩这一不良岩体不断被发现, 对工程的基础设计产生了很大影响。

国内针对硫酸盐对混凝土的腐蚀机理有较多研究, 但含泥质石膏岩与其他硫酸盐对混凝土的侵蚀作用较为不同, 且针对性研究成果较少。本文以实际项目为依托, 对含泥质石膏岩中硫酸盐的作用机理进行分析, 对以该岩层为持力层的桩基设计提出解决方案和建议措施。

1 工程概况

成都锦言大桥位于成都市南部, 跨越锦江。是国内首座空间异性拱形单索面无系杆车行斜拉桥, 其主梁跨径 138 m, 桥宽 30 m, 主拱跨径 135 m, 与主梁斜交 18°。

根据该桥实际受力情况, 拱座桩基直径 2.8 m, 需要以中风化含泥质石膏岩为持力层。

2 场地地质情况

该项目桥位构成场地的地层为: 第四系全新统人工填土层(Q₄^{ml}), 第四系全新统冲洪积层(Q₄^{al+pl}), 下伏白垩系灌口组(K_{2g})基岩。

含泥质石膏岩属于白垩系灌口组(K_{2g})基岩: 紫红色夹白色, 粒~板状结构, 泥岩中主要矿物为 0.1~2.0 mm 粒~板状石膏, 另外含有少量水云母等泥质物, 岩质较软, 岩石较完整, 岩芯呈柱状。岩石

为软岩, 岩体完整程度为较完整。顶面埋深一般 24.40~30.00 m, 标高 458.66~462.17 m。在 50 m 钻孔深度范围内风化程度均为中风化, 分布稳定, 厚度大。

为进一步了解含泥质石膏中硫酸盐浓度分布, 对岩层中不同深度进行取样分析, 编号 1 和 2 分别对应锦江东岸的钻孔, 见表 1。

表 1 桥位钻孔取样分析

样品编号	样品深度/m	Ca ²⁺ /(mg·kg ⁻¹)	Mg ²⁺ /(mg·kg ⁻¹)	Cl ⁻ /(mg·kg ⁻¹)	SO ₄ ²⁻ /(mg·kg ⁻¹)	HCO ₃ ⁻ /(mg·kg ⁻¹)
1	31.5	2 819.9	72.7	20.0	7 485.3	146.4
1	38	2 981.5	48.5	48.5	9 550.6	146.4
1	40	2 723.0	111.5	34.3	7 465.9	122.0
1	45	3 183.5	12.1	30.0	8 900.9	73.2
1	49.5	2 585.6	60.6	308.3	76 695.4	225.7
2	28.5	2 803.8	63.0	122.7	9 899.6	115.9
2	33.5	2 617.9	147.9	34.3	8 328.9	109.8
2	39.5	2 613.9	80.0	64.2	9 550.6	146.4
2	44.5	2 925.0	130.9	24.3	7 873.2	164.7
2	50.5	2 080.6	60.6	224.1	69 956.6	225.7

除上述试验数据外, 各深度均未发现碳酸根离子, 各深度的 pH 值在 7.2~7.6 之间。

由上表可看到, 钻孔深度 50 m 左右的硫酸根离子含量有明显的突变, 最高达到 76 695 mg/kg。深度 28~45 m 硫酸根离子含量较为稳定, 在 7 400~9 550 mg/kg 之间, 较高于已知周边其他项目(世纪城二期、金融城大厦), 硫酸根离子含量为 4 760~6 460 mg/kg^[4]。

3 硫酸盐腐蚀性判定方法

根据《公路工程混凝土结构耐久性设计规范》(JTG T3310—2019) 中 4.7 条款, 盐结晶环境下公路

收稿日期: 2021-08-16

作者简介: 罗宇(1980—), 男, 本科, 高级工程师, 从事桥梁设计工作。

工程混凝土结构的环境作用等级划分见表2。

表2 盐结晶环境的作用等级

环境作用等级	环境条件	
	水体中 SO ₄ ²⁻ 浓度 / (mg·L ⁻¹)	土体中 SO ₄ ²⁻ 浓度(水溶值) / (mg·L ⁻¹)
V-D	Δ ≤ 10℃, 有干湿交替作用的盐土环境 200 ~ 2 000	300 ~ 3 000
V-E	Δ ≤ 10℃, 有干湿交替作用的盐土环境 2 000 ~ 4 000	3 000 ~ 6 000
V-F	Δ > 10℃, 有干湿交替作用的盐土环境 4 000 ~ 10 000	6 000 ~ 15 000

根据该规范的5.3.10条款,混凝土的抗硫酸盐冻融循环性能应按表3规定执行。

表3 混凝土抗硫酸盐结晶侵蚀性能

环境作用等级	抗硫酸盐结晶破坏等级	
	100 a	50 a(30 a)
V-D	≥KS 90	≥KS 60
V-E	≥KS 120	≥KS 90
V-F	≥KS 150	≥KS 120

根据《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082),每个干湿循环总时间应为(24 ± 2)h。以KS 150为例,实验验证需要178 d(28 d强度养护 + 150 d干湿循环检验)。

一般来说,基础是桥梁施工的首先施工的部位,若要求实验验证后再进行桩基施工,则过长的实验周期会对工期产生较大影响,所以了解硫酸盐腐蚀机理和合理的抗腐蚀措施至关重要。

4 硫酸盐腐蚀机理

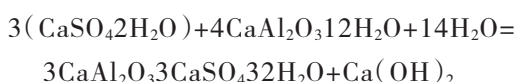
硫酸盐对混凝土的腐蚀机理主要是硫酸盐结晶导致的混凝土膨胀破坏,分为物理和化学破坏两种^[8]。

4.1 化学破坏

绝大部分硫酸盐的化学破坏分为两个部分。第一步是硫酸盐与水泥水化产物Ca(OH)₂生成硫酸钙,即二水石膏,此过程体积增大1.24倍。以硫酸钠盐为例,第一步反应方程式为:



第二步是硫酸钙再次与水泥中的固态水化铝酸钙反应生成三硫型水化铝酸钙(又称钙矾石),反应方程式为:



钙矾石是溶解度极小的盐类物质,其体积约为原水化铝酸钙的2.5倍,体积显著增大,致使混凝土

结构物受到开裂破坏。混凝土表面的开裂破坏又会使外部硫酸盐更容易进入混凝土内部,不断地循环发展,使得混凝土很快破坏^[5]。

由于石膏岩环境中石膏天然状态下不具备膨胀性^[4],遇水即转变为二水石膏,故石膏岩对混凝土的破坏主要是钙矾石结晶破坏。

4.2 物理破坏

在干湿交替作用下,侵入混凝土孔隙中的硫酸盐溶液随着浓度的增加达到过饱和而结晶,对孔壁产生极大地结晶压力,使混凝土破坏。

5 抵抗硫酸盐侵蚀的方法及适用性分析

5.1 抗硫水泥

抗硫水泥分为中抗硫酸盐水泥和高抗硫酸盐水泥,其原理是减少水泥中硅酸三钙和铝酸三钙的含量。因为硅酸三钙(C₃S)水化析出Ca(OH)₂,铝酸三钙(C₃A)水化析出水化铝酸钙,降低硅酸三钙和铝酸三钙的含量也就降低了形成Ca(OH)₂和石膏的可能性,见表4。

表4 水泥中硅酸三钙和铝酸三钙的含量(质量分数)

分类	硅酸三钙含量	铝酸三钙含量
中抗硫酸盐水泥	不大于55.0%	不大于5.0%
高抗硫酸盐水泥	不大于50.0%	不大于3.0%

《抗硫酸盐硅酸盐水泥》(GB 748—1996)中附录A中注明:中抗硫酸盐水泥,一般用于硫酸根离子浓度不超过2 500 mg/L的纯硫酸盐的腐蚀;高抗硫酸盐水泥,一般用于硫酸根离子浓度不超过8 000 mg/L的纯硫酸盐的腐蚀。而较新规范《抗硫酸盐硅酸盐水泥》(GB 748—2005)中将此条款删除。

笔者认为其原因可能有以下几点:

(1)不适用所用种类的硫酸盐腐蚀,如对硫酸镁,硫酸铵等作用甚微。

(2)不适用于干湿交替作用的盐土环境,因为在干湿循环作用下,若混凝土的密实性不佳,硫酸盐介质渗入混凝土中,产生结晶,会导致开裂破坏。

此外,抗硫酸盐水泥属于特种水泥,需要水泥厂按需成产,价格较高,比普通水泥的价格贵35%~40%,故近年来实际工程中使用较少。

锦言大桥桩基所处环境为干湿交替作用的环境,故不适合采用抗硫酸盐水泥作为防腐措施。

5.2 抗侵蚀抑制剂

硫酸盐抗侵蚀抑制剂也称结晶化抑制剂,基本上所有的商业抑制剂都是有机化合物,主要是聚羧

酸盐和磷酸盐等。其作用原理是通过阻止临界晶核的生长来阻止结晶。晶核大小非常小,在溶液中极不稳定,这些不稳定的晶核的生长被阻止后,由于其达不到稳定的尺寸儿快速溶解,因此不会出现宏观性的大晶体,也就阻止了结晶导致的破坏。如一些磷酸盐,可以吸附在钙矾石临界晶核上,有效地阻止了钙矾石凝胶向晶体转变时的成核和生长过程^[2]。一些抑制剂也会使混凝土吸水速率、失水速率均变慢,可有效抑制水分及离子在混凝土内部的传输^[11],从而抑制混凝土内部结晶破坏。

结晶化抑制剂在沿海地区已有较多使用案例,如通明海特大桥、南沙大桥、调顺大桥、洛溪大桥等工程。

2020年7月1日实施的《混凝土抗侵蚀抑制剂》中仅对硫酸盐作用环境 V-E 及以下级别进行分类,故笔者认为,使用对于硫酸根离子含量超出规范中的数值(见表2)的情况,抗侵蚀抑制剂仅可作为辅助措施。

5.3 优质矿物掺合料

由硫酸盐腐蚀机理可知,混凝土的密实度越高,混凝土的孔隙率越小,那么硫酸盐溶液就越难渗入混凝土的孔隙内部,故在混凝土内部产生结晶物质的速度和数量必然减少。

提高密实度的常用的方法有掺粉煤灰、硅灰等掺合料以及降低水灰比。值得注意的是单纯提高密实度必然会增加混凝土的强度及减少混凝土的和易性,在桩基混凝土配合比设计中尤其需要注意。另一方面,可以用混凝土的强度反映混凝土的密实度。

此外,研究表明,使用粉煤灰、矿渣、硅灰、天然火山灰的等辅助材料可以减缓延迟钙矾石的生成^[2]。

5.4 抗侵蚀措施选用

锦言大桥桩基础按最不利状况(即 SO_4^{2-} 含量 76 695 mg/kg)选取抗硫酸盐侵蚀措施。根据上述抗硫酸盐侵蚀方法及适用性分析,采用“普硅水泥(抗硫水泥)+优质矿物掺合料(粉煤灰、硅灰)+抗硫抑制剂”作为桩基混凝土的防腐蚀措施。

6 桩基设计

依托锦言大桥工程,对石膏岩中的桩基耐久性设计步骤提出以下建议。

6.1 明确硫酸根离子浓度分布

在设计中,不能简单地依据地勘报告中的数据

量数据,这一数据并不能代表硫酸盐整个岩层中的分布。应在详勘阶段提出对岩层中不同深度进行取样分析的要求,为设计提供数据支撑。

若有硫酸根离子高浓度区,桩基应尽量不伸入该区域,并保留一定安全距离。如锦言大桥桩底设计在该高浓度区上方 5.5 ~ 8 m。

6.2 明确硫酸根离子浓度参考设计值

石膏岩中,土体中的硫酸根离子含量非常高,但根据规范,判断腐蚀等级应根据岩体溶于水后水溶液中的硫酸根离子,即“水溶值”,这不难理解,因为硫酸盐只有溶于水后方可进行相应的的化学反应。例如锦言大桥,由表1可知,桩基范围内硫酸根离子水溶值含量在 7 400 ~ 9 550 mg/kg 之间,但此范围内岩体中全部硫酸根离子含量高达 38w mg/kg。前者远小于后者,故根据其水溶值含量数据判定锦言大桥桩基环境作用等级为 V-F。

6.3 明确防腐蚀的措施

在石膏岩这一岩层中,笔者认为防止硫酸盐结晶破坏最有效的方法是提高混凝土的密实度,具体措施为增加掺粉煤灰等掺合料以及降低水胶比。无需使用抗硫酸盐水泥。

6.4 明确配合比

锦言大桥按照 C50 水下混凝土进行配合比设计,具体见表5(表5中无粗细骨料)。

表5 锦言大桥桩基混凝土配合比设计

材料名称	水	水泥	减水剂	抗侵蚀抑制剂	粉煤灰	硅灰
每 m ³ 用量 /kg	140	360	7.82	20	80	30
重量比	0.39	1	0.022	0.056	0.222	0.083

该配合比混凝土的 7 d 强度 51.0 MPa, 28 d 强度 62.2 MPa。并按最不利状况(即 SO_4^{2-} 含量 76 695 mg/kg)进行耐久性实验检测,120 次硫酸盐干湿循环后耐腐蚀系数为 98.3%,150 次硫酸盐干湿循环后耐腐蚀系数为 93.9%。

实验结果表明,该配合比满足抗硫酸盐腐蚀要求,可作为类似工程项目的参考。

6.5 其他要求

(1)现场应进行非原桩位试桩,验证混凝土的工作性能。

(2)桩基主筋保护层加大至 10 cm。

(3)预埋注浆阀,预留桩底后压浆条件,桩基施工完成后采用水泥浆对可能存在的桩底空隙做后压浆处理。

7 结 语

该文提出了含泥质石膏岩中的腐蚀机理、合理有效的抗腐蚀措施及桥梁桩基设计的要点,根据实际工程及实验进行检测,并得出以下结论:

(1)石膏岩层中硫酸盐含量随深度变化而不同,实际项目中应在不同深度取样分析,根据硫酸盐含量分布确定桩基长度。

(2)石膏岩对混凝土的破坏与其他硫酸盐不同,主要是钙矾石结晶破坏。

(3)判断石膏岩腐蚀性时,应采用石膏岩中硫酸根离子水溶值含量,而非单位岩体中全部硫酸根离子含量,一般来说,前者远小于后者。

(4)防止石膏岩中硫酸盐结晶破坏最有效的方法是提高混凝土的密实度。

参考文献:

- [1] 孟庆业.水泥基胶凝材料中碳硫硅钙石的形成研究[D].湖南长沙:中南大学,2014.
- [2] 马忠诚.一种钙矾石结晶化抑制剂的合成及其性能研究[Z].北京:中国建筑材料科学研究总院,2010.
- [3] 戴文波,蒋世琼.混凝土抗硫酸盐侵蚀的研究[J].现代企业文化,2010(15):122-122.
- [4] 李科学,阳凌峰,王新荣.成都市南部含泥质石膏岩地层工程地质特性的认识[J].四川建筑,2012,32(6):77-78.
- [5] 金雁南,周双喜.混凝土硫酸盐侵蚀的类型及作用机理[J].华东交通大学学报,2006,23(5):4-8.
- [6] 牛斌涛,王山峰,姜骞,等.硫酸盐腐蚀地质环境中的桩基混凝土抗腐蚀试验研究与机理分析[J].建筑施工,2015,293(10):1229-1231.
- [7] GB/T 50082,普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准[S].
- [8] JTG T3310—2019,公路工程混凝土结构耐久性设计规范[S].
- [9] GB 748—2005,抗硫酸盐硅酸盐水泥[S].
- [10] JC/T 2553—2019,混凝土抗侵蚀抑制剂[S].
- [11] 石亮,谢德擎,王学明,等.抗侵蚀抑制剂对混凝土吸水性能及抗盐结晶性能的影响[J].材料导报,2020(14):14093-14098.

(上接第 80 页)

构性能、桥下道路和其他建(构)筑物布置、周边环境特点、经济性等因素。

(2)相较于钢箱梁,下承式拱形钢桁架梁杆件受力简单明确,可充分发挥材料的受力性能,梁高对梯道的布置影响小,用钢量更少,经济性更好,而且拱形结构景观效果好,与周围环境的相容协调性好,适用于跨度较大的城市人行天桥。

(3)桁架杆件节点采用无节点板设计,美观性较好,但需采取措施来减小节点处的应力集中。本次设计采用节点杆件侧板整体切割成形、杆件之间圆弧过渡、弦杆增设加劲隔板等措施,可有效减小节点处的应力集中。

(4)计算结果显示,相较于杆件承载力,该天桥竖向自振频率富余度更小,故跨度较大的拱形钢桁架天桥设计应特别关注自振频率是否满足规范要求。可通过增加跨中梁高、增大弦杆截面等方式来提高自振频率。

参考文献:

- [1] 官润荣.箱形截面杆件无节点板全焊钢桁架人行天桥设计[J].城市道桥与防洪,2009(8):68-70.
- [2] CJJ 69—95,城市人行天桥与人行地道技术规范[S].
- [3] 李秉男.箱形截面杆件三角形钢桁架人行天桥结构设计[J].中国市政工程,2011(4):10-11.