

文章编号:1671-8879(2005)05-0001-05

高性能混凝土应力腐蚀影响因素显著性分析

陈拴发, 王秉纲

(长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064)

摘 要:混凝土的应力腐蚀破坏是影响其耐久性能的主要原因。利用自行设计的应力腐蚀加载试验装置,通过正交设计方法,研究了高性能混凝土在 3 分点加荷及腐蚀溶液耦合作用下抗折强度衰减规律,提出了应力腐蚀因子和介质腐蚀因子两项评价指标,根据方差结果分析了不同影响因素对高性能混凝土应力腐蚀试验结果的敏感性。结果表明,水胶比、粉煤灰掺量、腐蚀溶液对高性能混凝土应力腐蚀因子和介质腐蚀因子都具有显著的影响,但水胶比对其影响特别显著,而应力水平仅对应力腐蚀因子的影响具有显著性。因此,对配合比设计参数中的水胶比、外掺材料进行优化设计可有效地提高公路建设用混凝土的耐久性。

关键词:道路工程;高性能混凝土;应力腐蚀;腐蚀因子;显著性

中图分类号:U414.18

文献标识码:A

Prominent property analysis of influential factors of high performance concrete (HPC) stress corrosion

CHEN Shuan-fa, WANG Bing-gang

(Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry
of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: Stress corrosion damage is the main reason of influencing concrete durability performance. With the loading test equipment of stress corrosion designed specially, through orthogonality design method, the paper studied the bending strength attenuation discipline of HPC withstanding coupling action of simultaneous action of third point loading and corrosion solution, put forward two evaluation targets of stress corrosion factor and medium corrosion factor, and analyzed the sensitivity of different influential factors on stress corrosion test results according to variance results. The results indicate that water binder ratio, dosage of fly ash and corrosion solution all have prominent influence on the stress corrosion factor and medium corrosion factor of HPC in which the influence of water binder ratio is most prominent, while stress level only has prominent influence on stress corrosion factor. Therefore, the optimum design of mixture ratio design parameters of cement binder ratio and admixtures can effectively enhance the durability of concrete used in road construction. 9 tabs, 2 figs, 8 refs.

Key words: road engineering; HPC; stress corrosion; corrosion factor; prominent property

收稿日期:2004-09-12

基金项目:交通部公路工程行业标准制定项目(2000 05)

作者简介:陈拴发(1963-),男,陕西长武人,长安大学副教授,博士。

0 引言

混凝土结构物或混凝土构件存在于腐蚀介质环境中,在远低于其设计强度的荷载作用下就可能发生延迟破坏,这种腐蚀介质和荷载应力耦合作用下的破坏定义为应力腐蚀开裂引起的破坏。长期以来,混凝土材料被视为一种耐腐蚀、对外界环境不敏感的复合材料。但越来越多的研究表明^[1~4],水泥混凝土在成型、硬化过程中不可避免地产生许多初始缺陷,以及水泥本身的化学性质是水泥混凝土抵抗各种腐蚀介质能力较差的主要原因。与此同时,高性能混凝土(high performance concrete,简称 HPC)已经开始在工程中使用,但其设计准则还是按传统的理论,混凝土中的应力不超过安全的容许应力。这种容许应力既没有考虑混凝土所处的腐蚀环境对其侵蚀破坏作用,也没有考虑混凝土处于腐蚀环境介质中在长期荷载作用下的应力腐蚀开裂,特别是现行的混凝土耐久性的评价方法都是以单因素指标建立的破坏模型来预测寿命,这跟工程的实际应用情况差异较大^[5,6]。因此,评估高性能混凝土的耐久性与抗化学侵蚀特性时必须考虑应力的影响,更应该研究其应力腐蚀影响因素。

1 试验用原材料、腐蚀介质及混凝土配合比设计

1.1 试验用原材料

(1)水泥:采用唐山冀东水泥厂生产的盾石牌 42.5 普通硅酸盐水泥,化学成分见表 1。

表 1 冀东盾石牌 42.5 普通硅酸盐水泥的化学成分

化学成分	含量/%	化学成分	含量/%	化学成分	含量/%
SiO ₂	21.68	CaO	64.98	碱含量	1.04
Al ₂ O ₃	5.34	MgO	1.17	不溶物	0.07
Fe ₂ O ₃	3.47	f-CaO	0.58	烧失量	2.68

(2)粉煤灰:采用唐山斗和电厂一级电吸尘粉煤灰,化学组成见表 2,粉煤灰烧失量为 2.3%,需水量为 95%,比表面积为 9 900 cm²·g⁻¹。

(3)砂:西安灞河砂,为 II 区中砂,颗粒级配良

表 2 唐山斗和电厂一级粉煤灰的化学成分

化学成分	含量/%	化学成分	含量/%	化学成分	含量/%
SiO ₂	59.34	CaO	4.18	K ₂ O	2.17
Al ₂ O ₃	20.06	MgO	2.07	Na ₂ O	0.71
Fe ₂ O ₃	9.70	SO ₃	0.79	烧失量	2.30

好,视密度 2.65 g·cm⁻³,细度模数 2.92,含泥量小于 2.0%。

(4)碎石:陕西石灰岩碎石,连续级配,最大粒径取 10 mm。

(5)外加剂:选用两种外加剂,分别为粉状高效减水剂 UNF-5 与 SDB 羧酸系列液体高效减水剂。

1.2 腐蚀介质的种类及其浓度

选取 MgCl₂、Na₂SO₄、MgSO₄ 等 3 种腐蚀介质作为高性能混凝土应力腐蚀所用浸蚀介质,清水(自来水)作为对比标准试验用介质,各种腐蚀介质及浓度见表 3。

表 3 试验用腐蚀介质及浓度

腐蚀介质种类	腐蚀介质浓度/%	备注
Na ₂ SO ₄	10	工业 Na ₂ SO ₄ 加入水中
MgSO ₄	10	分析纯 MgSO ₄ 加入水中
MgCl ₂	27	分析纯 MgCl ₂ 加入水中
水	—	自来水

1.3 高性能混凝土配合比设计及影响因素方案设计

本文选取水胶比、粉煤灰掺量、应力水平(0.15、0.30、0.45、0.60)、腐蚀介质等试验参数研究高性能混凝土在其影响因素作用下的腐蚀规律,探讨各影响因素对应力腐蚀破坏作用的敏感性。为此,利用正交设计方法专门设计了 16 组配合比进行应力腐蚀试验,其因素与水平的安排见表 4,混凝土配合比及部分试验结果见表 5,应力腐蚀正交试验安排见表 6。为进行比对,每组试件分别进行标准养护和与应力腐蚀试件同介质条件下的腐蚀试验(应力水平为 0)。

表 4 应力腐蚀试验因素与水平

水平	粉煤灰掺量/%	水胶比	应力水平	腐蚀溶液
1	0	0.33	0.15	自来水
2	10	0.30	0.30	Na ₂ SO ₄
3	20	0.27	0.45	MgSO ₄
4	30	0.25	0.60	MgCl ₂

2 应力腐蚀试验方法

利用反力架对高性能混凝土试件进行加载,并通过对比受应力作用混凝土和非应力作用混凝土在腐蚀介质中的抗折强度变化情况,分析高性能混凝土在应力作用下的腐蚀规律。

考虑到试验加载及尽量减少与应用情况的差异,试验采用尺寸大小为 40 mm×40 mm×160 mm

表 5 混凝土配合比及部分试验结果

序 号	1 m ³ 混凝土材料用量/kg						工作性/mm		抗压强度/MPa		
	水泥	粉煤灰	水	砂	石子	外加剂	坍落度	扩展度	7 d	28 d	60 d
1	450	0	150	820	950	6.75	15	未坍落	48.8	59.7	67.0
2	405	45	150	810	950	6.75	180	370	47.8	59.0	70.3
3	360	90	150	800	950	6.75	210	400	45.6	65.2	73.2
4	315	135	150	790	950	6.75	195	390	35.6	56.1	71.5
5	500	0	150	810	950	7.50	5	未坍落	56.5	64.9	76.2
6	450	50	150	800	950	7.50	215	410	59.3	71.3	74.8
7	400	100	150	790	950	7.50	240	470	55.0	77.6	82.3
8	350	150	150	780	950	7.50	240	545	47.2	71.8	77.2
9	550	0	150	800	950	8.25	30	未坍落	57.0	67.3	75.7
10	495	55	150	790	950	8.25	235	465	58.9	83.5	84.8
11	440	110	150	780	950	8.25	235	500	61.4	72.4	87.8
12	385	165	150	770	950	8.25	245	600	52.3	70.2	79.6
13	600	0	150	790	950	9.00	180	未坍落	60.6	64.8	51.9
14	540	60	150	780	950	9.00	220	480	58.6	70.0	77.5
15	480	120	150	770	950	9.00	230	520	60.9	67.3	81.4
16	420	180	150	760	950	9.00	240	510	44.5	60.6	79.2

注:混凝土中外加剂组成为(占胶结料重):1.0%UNF-5(粉剂)+0.5%SDB(水剂)。

表 6 应力腐蚀试验方案

试验 序号	粉煤灰 掺量/%	水胶比	应力比/%	腐蚀溶液
C1	0	0.33	15	清水
C2	0	0.30	30	Na ₂ SO ₄
C3	0	0.27	45	MgSO ₄
C4	0	0.25	60	MgCl ₂
C5	10	0.33	30	MgSO ₄
C6	10	0.30	15	MgCl ₂
C7	10	0.27	60	清水
C8	10	0.25	45	Na ₂ SO ₄
C9	20	0.33	45	MgCl ₂
C10	20	0.30	60	MgSO ₄
C11	20	0.27	15	Na ₂ SO ₄
C12	20	0.25	30	清水
C13	30	0.33	60	Na ₂ SO ₄
C14	30	0.30	45	清水
C15	30	0.27	30	MgCl ₂
C16	30	0.25	15	MgSO ₄

的试件。在进行应力腐蚀试验前,首先按 3 分点加荷方式确定标准养护试件 60 d 的破坏荷载,然后根据计算的应力水平对试件进行 3 分点加荷(试件和加载支点的组装方式见图 1 和图 2),加载结束后放入腐蚀溶液中浸泡 120 d。为保证试验过程中荷载的稳定性,加荷装置根据应力环显示的数据及时给予加载(扭力试件架用扭力扳手进行调整),消除由于试件的徐变或其他机械原因产生的应力松弛。

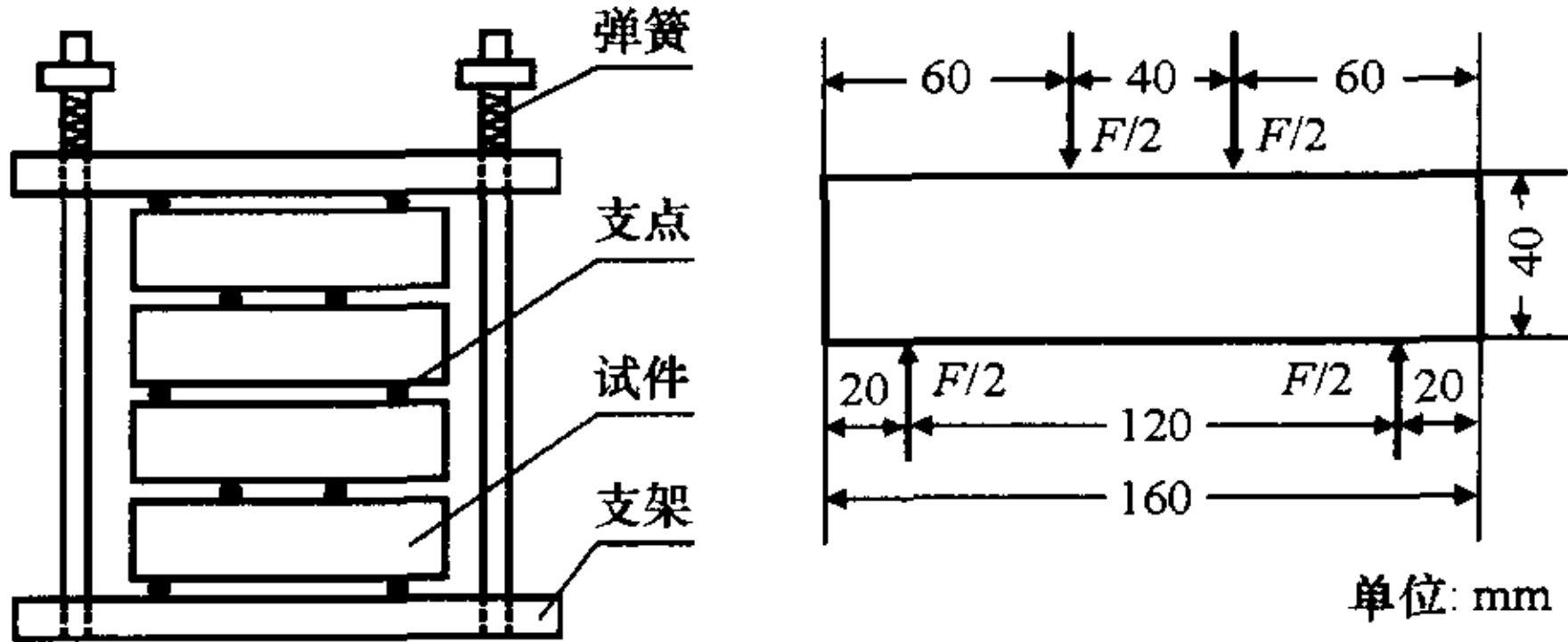


图 1 试件的组装方式

图 2 试件的加荷方式

3 试验结果及分析

应力腐蚀是应力与腐蚀介质对混凝土的耦合作用。单一的腐蚀介质或应力对混凝土的破坏作用目前研究较多,但应力与腐蚀介质共同作用对混凝土耐久性能的影响绝不是两者之间的简单叠加,应是

两者之间的耦合。国内外对两者之间的耦合作用研究较少,同时也没有相应的评价指标。鉴于此,为方便分析,本文提出了应力腐蚀因子与介质腐蚀因子两项评价指标^[7,8],来分析各影响因素对高性能混凝土在应力腐蚀作用下其抗折强度损失规律的显著性。

3.1 评价指标

3.1.1 应力腐蚀因子

考虑应力因素对受腐蚀混凝土强度的影响,也就是说,受腐蚀介质作用的混凝土,在一定时间内,弯拉强度由于应力作用而发生变化,用 K_{sc} 表示。

$$K_{sc} = f_{cfsc} / f_{cf180}$$

式中: K_{sc} 为应力腐蚀因子; f_{cf180} 为混凝土小梁试件标准养护 180 d 弯拉强度(MPa); f_{cfsc} 为标养 60 d、应力腐蚀 120 d 混凝土小梁试件弯拉强度(MPa)。

可以看出, K_{sc} 可以反映水泥混凝土受应力腐蚀作用其力学性能的衰减程度,该值越小,混凝土在环境腐蚀介质中受应力作用的破坏就越强,其抗折强度下降就越大;反之,受应力腐蚀的作用则越弱。

3.1.2 介质腐蚀因子

本项试验仅考虑环境腐蚀介质因素对混凝土强度的影响,即受腐蚀的混凝土,在一定时间内,由于环境因素的腐蚀作用致使其强度降低,用 K_c 表示。

$$K_c = f_{cfc} / f_{cf180}$$

式中: K_c 为介质腐蚀因子; f_{cfc} 为标养 60 d、腐蚀介质中浸泡 120 d 混凝土小梁试件弯拉强度(MPa)。

3.2 结果分析

按照表 5、表 6 进行的正交设计应力腐蚀试验结果见表 7。可以看出,16 组混凝土的应力腐蚀因子与介质腐蚀因子都小于 1,而应力腐蚀因子又普遍小于介质腐蚀因子,这说明由于应力的存在,混凝土的力学强度损伤比单一的腐蚀介质的作用更为强烈。

由表 7 计算结果,对应力腐蚀因子的影响因素进行方差分析,结果见表 8。可以看出,试验所选择的粉煤灰掺量、水胶比、应力水平、腐蚀介质等 4 个参数对应力腐蚀因子均有较大影响。其中 $F_{\text{水胶比}} = 31.2378 > F_{0.01}(3,3)$,则水胶比对应力腐蚀因子的影响特别显著;而 $F_{0.01}(3,3) > F_{\text{粉煤灰掺量}} = 11.9844$ 、 $F_{\text{腐蚀介质}} = 27.6023 > F_{0.05}(3,3)$,则表明粉煤灰掺量、腐蚀介质对应力腐蚀因子具有显著的影响,且腐蚀介质的影响明显超过了粉煤灰掺量对应力腐蚀因子的影响;同样的,由于 $F_{0.05}(3,3) > F_{\text{应力水平}} = 8.2939 > F_{0.1}(3,3)$,因此应力水平对应

表 7 高性能混凝土在不同腐蚀介质中
应力腐蚀因子及介质腐蚀因子计算结果

试验序号	标养 180 d (f_{cf180}) /MPa	标养 60 d、腐 蚀介质中浸 泡 120 d (f_{cfc}) /MPa	标养 60 d、 应力腐蚀 120 d(f_{cfsc}) /MPa	应力腐蚀 因子 K_{sc} (f_{cfsc}/f_{cf180})	介质腐蚀 因子 K_c (f_{cfc}/f_{cf180})
C1	9.31	8.59	7.82	0.840	0.923
C2	9.90	9.65	9.16	0.925	0.975
C3	10.92	8.54	8.57	0.785	0.782
C4	9.76	8.64	7.76	0.795	0.885
C5	9.98	9.65	8.99	0.901	0.967
C6	10.83	10.57	9.64	0.890	0.976
C7	10.63	9.14	8.40	0.790	0.860
C8	8.31	7.83	7.47	0.899	0.942
C9	9.76	9.02	8.63	0.884	0.924
C10	10.62	9.04	8.51	0.801	0.851
C11	11.42	9.98	9.69	0.849	0.874
C12	11.10	8.59	8.96	0.807	0.774
C13	9.18	8.76	8.03	0.875	0.954
C14	8.62	7.82	7.26	0.842	0.907
C15	9.96	8.38	7.83	0.786	0.841
C16	10.15	8.49	7.79	0.767	0.836

表 8 应力腐蚀因子方差分析结果

考察指标	方差来源	平方和	自由度	均方离差	F 值	显著性
应力腐蚀因子 K_{sc}	粉煤灰掺量	0.005 8	3	0.001 9	11.984 4	$F_{0.1}(3,3) = 5.39$ $F_{0.05}(3,3) = 9.28$ $F_{0.01}(3,3) = 29.46$
	水胶比	0.015 0	3	0.005 0	31.237 8	
	应力水平	0.004 0	3	0.001 3	8.293 9	
	腐蚀介质	0.013 3	3	0.004 4	27.602 3	
	误差	0.000 5	3	0.000 2		
	总和	0.038 6	15			

力腐蚀因子具有较为显著的影响。这也可以说明,在应力作用下腐蚀介质对混凝土的耐久性比单一的腐蚀介质作用更为显著,而以前仅考虑环境介质对混凝土的腐蚀作用,如此评价混凝土的使用寿命在一定程度上讲至少是不全面的。

另外,根据表 7 计算结果,将各设计参数对介质腐蚀因子的影响进行方差分析,分析结果见表 9。可以看出,粉煤灰掺量、水胶比、腐蚀介质对介质腐蚀因子同样都有较大的影响,尽管方差分析中出现

表 9 介质腐蚀因子方差分析结果

考察指标	方差来源	平方和	自由度	均方离差	F 值	显著性
介质腐蚀因子 K_c	粉煤灰掺量	0.013 32	3	0.004 44	4.514 3	$F_{0.1}(3,3)=5.39$ $F_{0.05}(3,3)=9.28$ $F_{0.01}(3,3)=29.46$
	水胶比	0.030 39	3	0.010 13	10.303 0	
	应力水平	0.000 57	3	0.000 19	0.194 5	
	腐蚀溶液	0.015 73	3	0.005 24	5.333 9	
	误差	0.002 95	3	0.000 98		
	总和	0.062 96	15			

了应力水平,但介质腐蚀因子是没有应力作用的。而表 9 应力水平的均方离差为 0.000 19,远小于误差产生的均方离差,因此,应力水平形成的 F 值可视为误差形成的。另外, $F_{0.01}(3,3) > F_{\text{水胶比}} = 10.303 > F_{0.05}(3,3)$,这表明水胶比对介质腐蚀因子同样具有显著影响;尽管粉煤灰掺量、腐蚀溶液的 F 值小于 $F_{0.1}(3,3)$,但他们基本接近了显著性 $F_{0.1}(3,3)$ 。因此他们对介质腐蚀因子还是具有较为显著的影响,且腐蚀溶液的影响明显要比粉煤灰掺量大一些。

以上分析可以看出,从粉煤灰掺量、水胶比、应力水平、腐蚀介质等 4 种因素对应力腐蚀因子、介质腐蚀因子造成影响的显著性来看,水胶比对两者造成的影响无疑都是最大的,也是最为显著的;而粉煤灰掺量、腐蚀溶液对混凝土的腐蚀同样具有一定的显著性;应力水平仅对混凝土应力腐蚀因子的影响具有显著性。鉴于此,在进行应力腐蚀的防护或要提高公路建设用混凝土的耐久性时,应对其配合比设计参数中的水胶比、外掺材料等进行优化设计,才能进一步提高混凝土的抗应力腐蚀能力。

4 结 语

(1) 采用正交设计方法,建立以应力腐蚀因子与介质腐蚀因子为指标的高性能混凝土应力腐蚀评价方法。

(2) 高性能混凝土应力腐蚀影响因素显著性分析结果表明,水胶比对其应力腐蚀具有特别显著的影响,而粉煤灰掺量、腐蚀溶液对高性能混凝土的应力腐蚀也都具有显著性,应力水平仅对混凝土应力腐蚀具有较强的显著性。

(3) 进行应力腐蚀的防护或要提高混凝土尤其是公路建设用混凝土的耐久性时,应对其配合比设计参数中的水胶比、外掺材料等进行优化设计。

参考文献:
References:

[1] 卢 木. 混凝土耐久性研究现状和研究方向[J]. 工业建筑, 1997, 27(5): 1—7.
LU Mu. Recent study and research directions of concrete durability[J]. Industrial Construction 1997, 27(5): 1—7.

[2] 陈拴发, 胡长顺. 公路结构物水泥混凝土耐久性研究动态[J], 公路, 2003, (5): 122—127
CHEN Shuan-fa, HU Chang-shun. Recent development in researches on cement concrete durability of highway structure[J]. Highway, 2003, (5): 122—127.

[3] Schneider E N, Dumat F F. Stress corrosion initiated of concrete[J]. Cement and Concrete Research, 1986, 16: 535—544.

[4] 田见效, 陈拴发, 彭 波. 超早强水泥稳定碎石路用性能[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2003, 23(5): 24—27.
TIAN Jian-xiao, CHEN Shuan-fa, PENG Bo. Road performance of aggregate mixture stabilized by super rapid strength-ening cement[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2003, 23(5): 24—27.

[5] Fikret Turker. Effects of magnesium sulfate concentration on the sulfate resistance of moetars with and without silica fume[J]. Cement and Concrete Research, 1997, 27(2): 205—214.

[6] 李运生, 张彦玲, 林玉森. 公路钢筋混凝土梁基于抗力劣化的可靠性分析[J]. 中国公路学报, 2003, 16(4): 50—54.
LI Yun-sheng, ZHANG Yan-ling, LIN Yu-sen. Reliability analysis of highway reinforced concrete beam based on resistance deterioration[J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16(4): 50—54.

[7] 陈拴发. 高性能混凝土应力腐蚀与腐蚀疲劳特性研究[D]. 西安: 长安大学, 2004.
CHEN Shuan-fa. Study on stress corrosion and corrosion fatigue of high performance concrete[D]. Xi'an: Chang'an University, 2004.

[8] 陈拴发, 王秉纲. 高性能混凝土应力腐蚀评价指标[J]. 交通运输工程学报, 2005, 5(1): 6—10.
CHEN Shuan-fa, WANG Bing-gang. Stress corrosion evaluation indices of high performance concrete[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005, 5(1): 6—10.