

論文 硫酸性地盤におけるコンクリートおよび内部の鉄筋の劣化・腐食に関する研究

武重雅彦^{*1}・松下博通^{*2}・岳尾弘洋^{*3}・佐藤俊幸^{*4}

要旨: 本論文は、W/C: 4.5, 5.5, 6.5% の鉄筋コンクリート供試体を、別府明礬温泉土壌に暴露した結果をまとめたものである。温泉土壌の腐食環境は、温泉成分が濃縮される表土が最も厳しいことが成分分析・供試体の劣化調査で明らかになった。フェノールフタレイン法で判定したコンクリートの劣化が、鉄筋位置に到達する以前に内部鉄筋の腐食が観察された。EPMA法で元素分布を調べると、その深さのコンクリートに硫黄化合物の存在が確認され、アルカリ性雰囲気下でも、鉄筋は硫酸イオンの影響を受けることが判明した。

キーワード: 硫酸性地盤, コンクリート劣化, 内部鉄筋腐食, EPMA

1. はじめに

コンクリート構造物は、その立地地盤環境からみた場合、温泉等による酸性地盤・硫酸塩土壌等により侵食を受け、その耐久性が問題となっている。既往の研究によれば、硫酸イオンがコンクリートにどのような影響を及ぼすかについては多くの報告されているが、内部鉄筋に対する影響について検討がなされていない [1]。そのため筆者らは、土壌中の酸及び硫酸イオンがコンクリートおよび鉄筋に及ぼす影響の程度を調べるために、鉄筋コンクリート供試体の硫酸性土壌暴露試験を行った。

本論文は、硫酸性温泉土壌暴露3年間の結果を、まとめたものである。また本研究は、平成3年に設立されたJCI「自然環境下のコンクリート性能研究委員会、暑中・土壌ワーキンググループ」の研究成果の一部である。

2. 硫酸性地盤でのコンクリートおよび鉄筋の劣化

2. 1 硫酸および硫酸塩によるコンクリートの劣化

硫酸および硫酸塩によりコンクリートは激しく劣化することが知られている。この劣化機構は、多数解説 [2] されているが、主にセメント水和反応で生成されるCa(OH)₂の消費、カルシウムアルミネートが、セメントバチルスを生成するときの膨張圧による劣化崩壊である。

2. 2 鉄筋の腐食

コンクリート中の鉄筋は、Ca(OH)₂の影響でアルカリ性雰囲気にあり、表面に不動態被膜を形成している。しかし、Ca(OH)₂が炭酸イオン・硫酸イオン等の影響で消費されると、コンクリートは表層よりアルカリ性を失っていく。この反応が、鉄筋位置まで到達すると、鉄筋が発錆し易くなる。従って、硫酸性地盤においては、鉄の発錆速度が速くなることが考えられる。

*1 ショーボンド建設(株)九州支店技術部長（正会員）

*2 九州大学教授、工学部建設都市工学科、工博（正会員）

*3 ショーボンド建設(株)九州支店技術課長

*4 (株)シーティアイ新技術代表取締役（正会員）

3. 試験方法

3.1 供試体

本試験では、内部鉄筋の発錆速度に及ぼす因子として、W C、かぶり厚さおよびひび割れの有無をとりあげ、 $10\text{cm} \times 10\text{cm} \times 40\text{cm}$ の鉄筋コンクリート供試体を作成した。使用コンクリートの配合を表-1に示す。鉄筋は、SD30A-D10を7本、図-1aのよう配置した。図-1bは、鉄筋記号を示している。ひび割れ入りの供試体は、図-2に示すように型枠底面(C面)側に、曲げ載荷により、載荷時0.2mm・除荷時0.03mm程度のひび割れを発生させた[3]。供試体のひび割れの有無は、有りをC・無しをNと記号表示する。

表-1 コンクリートの配合

W/C (%)	SL (cm)	air (%)	S/a (%)	W (kg)	単位重量(kg/m ³)			混和剤(cc/m ³)		NaCl (g/m ³)
					C	S	G	減水剤	AE剤	
45	9.5	4.2	42.7	172	382	732	1029	955	22.9	410
55	7.5	4.9	45	166	302	818	1026	755	15.1	400
65	6.5	5.0	47.1	165	254	876	1010	635	12.7	400

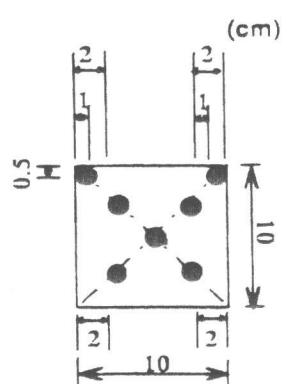


図-1a 鉄筋の配置

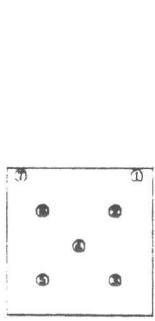


図-1b 鉄筋記号

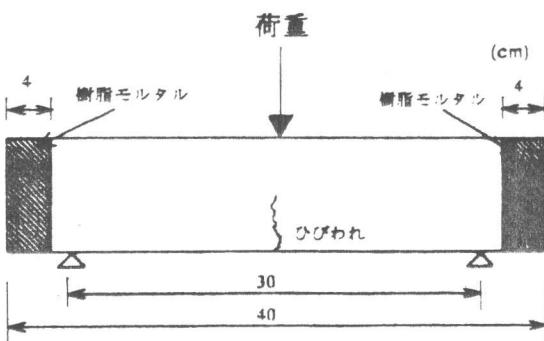


図-2 供試体の形状とひび割れ

3.2 暴露環境および暴露試験方法

今回、暴露試験場所として選定した別府明礬温泉土壌は、酸(硫酸)による腐食環境が、厳しい所である。

暴露試験場所の土壌分析結果

1.5年経過後の暴露場所の土壤成分分析結果を、表-2に示す。

試料名	項目	分析結果		
		pH	含水比 %	SO_4^{2-} mg/kg
明礬温泉 土 壤	表土	1.7	53.7	78400
	-10cm	2.3	70.6	7870
	-20cm	2.6	72.7	3310
	-30cm	2.5	80.6	3730

供試体は

、図-3に示すように、角柱供試体の下半分を土中に埋設し、気中・境界部(土壤表面部)および土壤中の環境の影響を、一度に調べられるように暴露した。供試体は、0.5年、1.5年、3年間暴露後回収し、コンクリートおよび内部鉄筋の劣化状況を測定した。

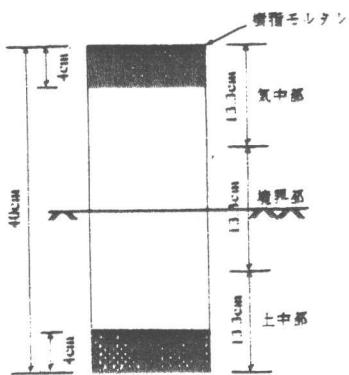


図-3 供試体暴露方法

4. 回収供試体の試験結果

4.1 コンクリートの外観観察

温泉土壌に3年暴露した

後の、回収直後の供試体の外観を、写真-1に示す。

土中部・境界部においては激しく劣化しており、モルタル分の溶出・粗骨材の露出がみられ、劣化の程度は土壌表面付近が最も進んでいた。また、供試体の境界部表面には、黄白色の析出物が付着していた。

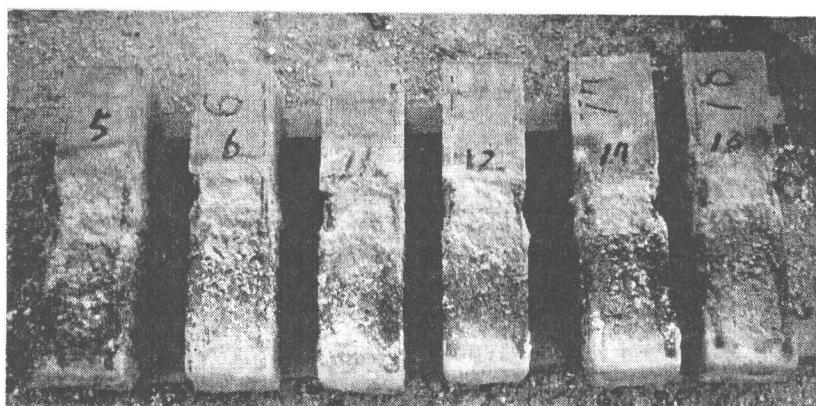


写真-1 回収直後の供試体の外観

4.2 コンクリートの侵食深さの測定

回収供試体を、長手方向に切断し、図-4に示すように長手方向全域にわたって、1cmピッチで温泉成分によりコンクリートが溶出した深さ（消失深さ）と、フェノールフタレンイン1%エタノール溶液噴霧により判定した中性化深さをもとめ、両者の合計を各測点の侵食深さとした。各W/Cのコンクリートの侵食深さの測定結果を、表-3に示すとともに、3年暴露侵食深さのグラフを図-5に示す。ここで、平均侵食深さの算出は、境界部は上位3測点、気・土中部は全測点の代数平均とした

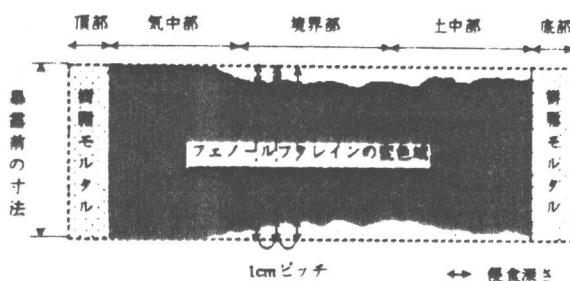


図-4 侵食深さ測定方法

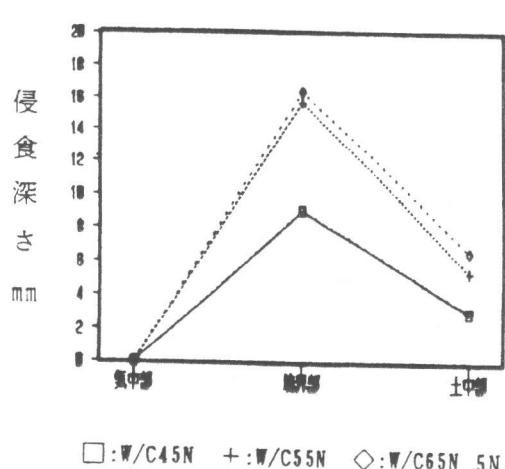


図-5 3年暴露後の侵食深さ

4.3 コンクリートの化学的分析の結果

(1) コンクリート表面劣化生成物の分析

種類	部位	ひびわれ	侵食深さ mm					
			0.5年		1.5年		3.0年	
			平均	最大	平均	最大	平均	最大
W/C:45%	境界部	N	1.1	1.6	3.9	4.2	9.0	12.0
	境界部	C	1.8	2.2	3.2	4.2	10.4	12.1
	土中部	N	0.6	1.8	1.6	1.9	3.0	6.2
W/C:55%	境界部	N	5.1	5.4	5.9	6.2	15.7	17.8
	境界部	C	5.0	5.4	7.1	7.8	15.9	17.6
	土中部	N	2.1	5.0	5.9	3.9	5.4	11.2
W/C:65%	境界部	N	4.7	6.8	10.3	10.7	16.4	17.4
	境界部	C	5.1	5.4	11.0	12.5	14.2	17.6
	土中部	N	1.6	4.2	4.1	8.3	6.6	9.3

暴露供試体表面に付着していた劣化生成物は、粉末X線回折により結晶鉱物の同定を行った結果、二水石膏 ($\text{CaCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) であった。二水石膏は、セメント水和物の Ca(OH)_2 と硫酸との反応生成物であることから、本分析結果においても、硫酸性腐食を受けたことが証明された。

(2) コンクリート中の硫黄元素の分析

コンクリートと内部鉄筋の腐食との関係の解明のために、温泉地盤から供給され、腐食性成分となる硫黄元素の侵入状況を、EPMAによるカラーマッピング手法で求めた。侵入深さの判定は、連続的に変化する硫黄の励起X線量の中で、便宜的に114カウント以上と定め、その位置をチャート上から10mmピッチで求めた。EPMAによる硫黄元素の侵入深さ解析結果を、表-4に示す。

4.4 内部鉄筋の外観観察

かぶり厚15mmの鉄筋②・③の腐食(発錆面積)測定結果を、表-5に示す。なお、土中部では供試体下端部に0.5年時から錆がみられ、コンクリートの侵食深さ結果と併せて、図-4に示した樹脂モルタルとの打継ぎ目からの侵入と判断し、考察の対象から除外した。一方、かぶり厚45mmの鉄筋は、いずれの供試体においても、腐食は認められなかった。また、かぶり厚0mmの鉄筋は、激しく腐食し、時間の経過とともに断面欠損の程度が増大していた。

表-4 硫黄の侵入深さ mm

供試体	期間		0.5年		1.5年		3年	
	平均	最大	平均	最大	平均	最大	平均	最大
W/C:45 C	3.6	4.1	6.2	6.5	17.0	18.0		
W/C:55 C	9.5	10.2	11.8	12.5	18.7	19.7		
W/C:65 C	6.8	7.5	13.7	15.5	23.6	24.6		

表-5 かぶり厚15mm鉄筋の発錆面積 cm^2

供試体記号	鉄筋	半年間		1年半		3年間	
		境界部	土中部	境界部	土中部	境界部	土中部
W/C:45 C	②	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	5.3
	③	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.2
W/C:45 N	②	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	③	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
W/C:55 C	②	0.0	0.6	0.0	5.0	1.7	3.7
	③	0.0	2.3	0.0	4.7	6.5	0.0
W/C:55 N	②	0.2	1.6	0.0	8.0	0.8	3.5
	③	0.0	0.6	0.0	4.3	5.4	0.0
W/C:65 C	②	0.0	1.2	4.3	6.4	1.6	3.0
	③	0.0	1.8	4.1	3.2	7.1	0.1
W/C:65 N	②	0.1	0.2	0.2	9.3	0.0	0.3
	③	0.0	0.6	0.0	0.0	2.3	0.9

5. 考察

5.1 明礬温泉土壤腐食環境

表-2は、温泉土壤成分の深さ方向の分布を示している。表土では、 H^+ 濃度がGL-30cmの濃度に対し約7倍、 SO_4^{2-} が同じく約20倍存在している。この原因は、土表面から水分が蒸発し、各種の塩が濃縮されることがあげられる。また本研究では確認していないが、下水道コンクリート構造物のバクテリア腐食[4]と同様に、様々な温泉成分硫黄化合物が表土に到達すると大気に接し、好気性バクテリアにより、 SO_4^{2-} にまで酸化された結果と考えられる。表土付近がコンクリートにとって最も厳しい腐食環境になることが、分析結果からいえる。

5.2 W/Cとコンクリートの侵食深さの関係

暴露期間と侵食深さの関係を、図-6 a～6 cに示す。また、暴露期間(X年)と侵食深さ

(Ymm)との関係について、原点を通る速度一次式として、最小二乗法で求めた結果を、表-6に示す。

暴露部位とコンクリートの侵食深さ
の関係を示した図-5は、土壤表面部最も劣化が進んでいる示しており、これは成分分析から述べた腐食環境の厳しさと符合している。この現象は、九州横断自動車道委員会報告[5]と一致し、これに記載されている速度式を

本実験結果と照合すると、表-3に示したW/C:55%の最大侵食深さに近似した。

表-6 劣化速度式

	土中部	境界部 N	境界部 C
W/C:45	$Y = 0.978X$	$Y = 2.891X$	$Y = 3.207X$
W/C:55	$Y = 1.773X$	$Y = 5.087X$	$Y = 5.290X$
W/C:65	$Y = 2.326X$	$Y = 5.826X$	$Y = 5.360X$

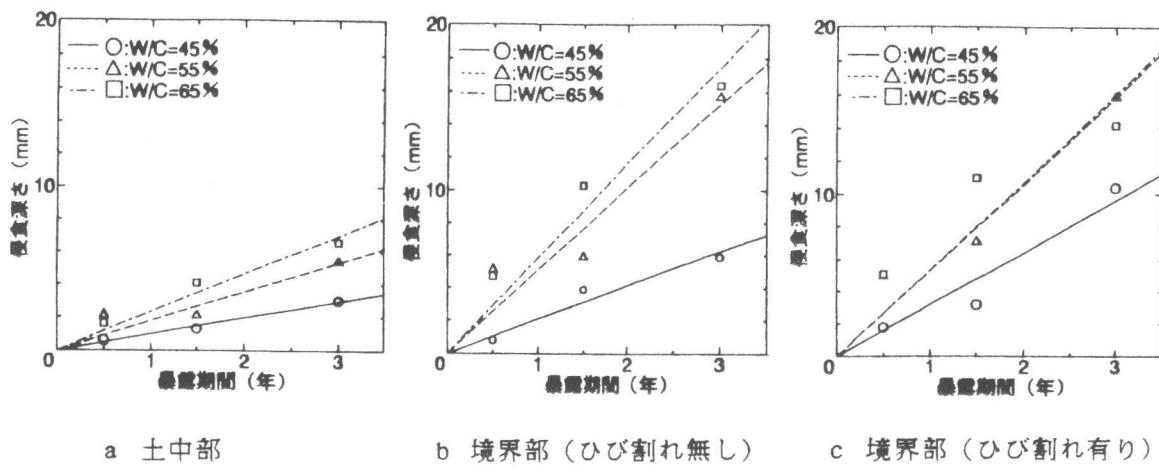


図-6 暴露期間とコンクリートの侵食深さの関係

W/Cと劣化速度の関係をみると、土中(SO_4^{2-} 濃度:約0.33%)では、W/Cが上昇するにつれて侵食深さが増大する傾向を示している。しかし境界部(SO_4^{2-} 濃度:約7.8%)では、W/C 55%と65%では、1.5年の結果以外は大きな差がなく、ほとんど同一の結果となった。このことは、 SO_4^{2-} 濃度が極端に高くなると、高W/Cコンクリートは使用できないことを暗示している。ちなみに土木学会では、 SO_4^{2-} が0.2%以上の環境下でのコンクリートのW/Cは、50%以下と規定している[6]。この実験からだけでは明らかにできないが、 SO_4^{2-} 濃度が極端に高い場合、あるW/Cを越えるとW/Cと劣化速度の関係において、直線性が失われるものと考えられる。

5.3 ひび割れの影響

ひび割れ部の暴露位置は、土壤表面である。本暴露試験では、供試体の外周から温泉土壤に含まれる成分により、面的に劣化が進行し、ひび割れ部は部分的に深く劣化していることが予測される。表-7は、かぶり厚15mmの鉄筋③とそのかぶりコンクリートの最大侵食深さおよび硫黄の最大侵入深さをまとめたものである。内部鉄筋の腐食が、ひび割れ供試体に早く発生していることから、ひび割れの影響を暗示しているが、暴露0.5年のEPMMA以外は、明確なひび割れ線が確認できなかった。このことは、EPMMA試験片のサンプリング方法に問題があり、全ての試験片がひび割れ部から採取できなかったことによる。

5.4 コンクリートの劣化と内部鉄筋の腐食の関係

フェノールフタレイン法で判定したコンクリートの侵入深さが、鉄筋位置に届けば内部鉄筋に錆が認められる。しかし、本方法で侵食していないと判定した、暴露1.5年のW/C:65Cのような場合でも、鉄筋の錆がでている。EPM-Aにより硫黄化合物の存在を判定すると、表-7に示したように、鉄筋位置以上に侵入していた。このことにより、コンクリートが中性になる以前に、硫黄成分により鉄筋の発錆が始まることが明らかになった。

EPM-A手法は費用・手間がかかりかつ定量分析性に難点があるため一般的ではない。硫黄侵入深さ測定の簡便的化を図るために、フェノールフタレイン法で求めた結果との係数を求めた。硫黄侵入深さは、表-7に示したデータの総和から求めた侵食深さに対する係数は、1.40倍であった。

6.まとめ

- 本暴露試験の結果から、次の結論を導いた。
- ①硫酸性温泉地盤では、硫酸イオンが表土に濃縮し、劣化環境がより厳しくなる。
 - ②フェノールフタレイン法で判定したコンクリートの侵食が、鉄筋位置に到達する前に、内部鉄筋の腐食が始まる。
 - ③硫黄化合物の侵入深さの簡便的な求め方は、フェノールフタレイン法で求めた侵食深さの1.4倍である。

参考文献

- [1] 例えば、松下博通、牧角龍憲、浜田秀則：第7回コンクリート工学論文集、pp65-67、1985
- [2] 例えば、松下博通、松藤泰典、菅伊三男：自然環境下でのコンクリートの性能研究委員会報告、自然環境とコンクリートの性能に関するシンポジウム論文集（日本コンクリート工学協会）、pp.371-376、1993
- [3] 山田人司、他：自然環境下でのコンクリートの性能研究委員会報告、自然環境とコンクリートの性能に関するシンポジウム論文集（日本コンクリート工学協会）、pp.308-321、1993
- [4] 例えば、野中資博：コンクリート微生物腐食とその対策、九州橋梁構造工学研究会、地下埋設RC構造物の耐久性に関する講習会テキスト、pp.12、1994
- [5] 九州横断自動車道（湯布院～大分）コンクリート温泉腐食試験報告書、1977
- [6] コンクリート標準示方書平成3年版【施工編】、pp.48、1991

表-7 侵食深さ・硫黄侵入深さ・鉄筋発錆面積一覧表

	測定項目	0.5年	1.5年	3年
W/C:45 C	C面最大侵食深さ mm	2.2	4.2	12.1
	硫黄最大侵入深さ mm	4.1	6.5	18.0
	鉄筋③発錆面積 cm ²	0	0	0.2
W/C:45 N	C面最大侵食深さ mm	1.6	4.2	12.0
	鉄筋③発錆面積 cm ²	0	0	0
	C面最大侵食深さ mm	5.4	7.8	17.6
W/C:55 C	硫黄最大侵入深さ mm	10.2	12.5	19.7
	鉄筋③発錆面積 cm ²	0	0	6.5
	C面最大侵食深さ mm	5.4	6.2	17.8
W/C:55 N	鉄筋③発錆面積 cm ²	0	0	5.0
	C面最大侵食深さ mm	5.4	12.5	17.6
	硫黄最大侵入深さ mm	7.5	15.5	24.6
W/C:65 C	鉄筋③発錆面積 cm ²	0	4.1	7.1
	C面最大侵食深さ mm	6.8	10.7	17.4
	鉄筋③発錆面積 cm ²	0	0	2.6