

写真1 コンクリート管の腐食状況

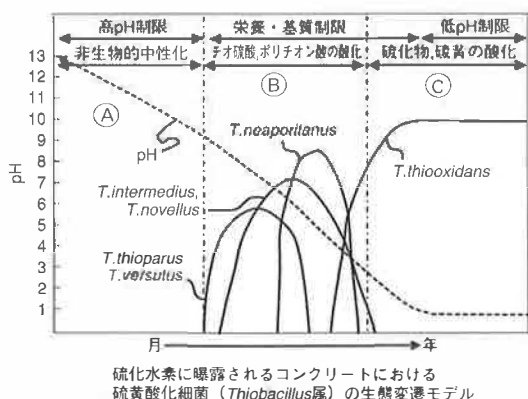


図2 コンクリート腐食に関わる硫黄酸化細菌⁵⁾

腐食状況を示す。図2は、コンクリートの腐食に関する硫黄酸化細菌群の経年(月)的な活動状況のモデルを示したものである⁵⁾。

防腐コンクリートの製造に用いる防腐剤は、「ニッケル」と「酸化タングステン」の混合物からなる。図3は硫黄酸化細菌の培地にニッケルを添加したものと無添加のものについて比較した結果である。無添加では硫酸の生成によりpH値は小さくなるが、ニッケルを一定量添加したものでは活動が阻害され、pH値の変化がないことが分かる。既往の研究結果によると、ニッケルは硫黄を酸化する酵素と結合して酵素の活動を阻害することが明らかになっている。また、酸化タングstenは図4に示すように、pH2.5の領域においても硫黄酸化細菌の生育を阻害することが確認されている。

このことから、ニッケルは中性領域(図2の領域(B))で、酸化タングstenは酸性領域(図2の領域(C))で、硫黄酸化細菌の酵素に働いて硫酸の生成を阻害する。したがって、硫黄酸化細菌が活動可能な全てのpH領域で有効な阻害効果を得るためには、ニッケルと酸化タングstenの併用が必要になる。最近の研究では、酸性域では硫黄酸化細菌よりも激しく鉄酸化細菌が活動し、硫酸を生成してコンクリートを著しく腐食させることが分かっている。酸化タングstenは、この鉄酸化細菌に対しても極めて有効な阻害効果を有していることが実験により証明されている。

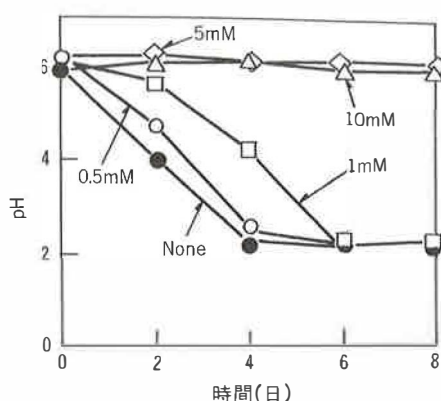


図3 硫酸ニッケルを用いた防腐剤の効果確認試験結果

培養液 pH=2.5	(培養液重量に対して)
酸化タングsten系薬剤 ($\text{CaWO}_4, \text{W}_{20}\text{O}_{58}, \text{W}$, パラタングsten酸アンモニウム(APT))	添加量 0.1%
酸化ニッケルA防腐剤 (NiO)	0.1%
金属ニッケル系防腐剤 (Ni)	0.1%

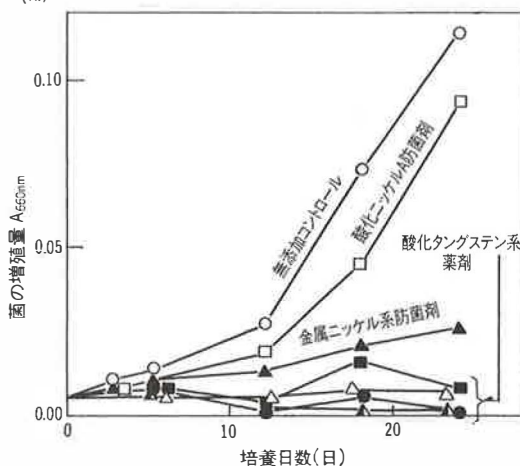


図4 pH=2.5における各種防腐剤の微生物抑制効果(硫黄無機塩培地)

域(C))で、硫黄酸化細菌の酵素に働いて硫酸の生成を阻害する。したがって、硫黄酸化細菌が活動可能な全てのpH領域で有効な阻害効果を得るためには、ニッケルと酸化タングstenの併用が必要になる。最近の研究では、酸性域では硫黄酸化細菌よりも激しく鉄酸化細菌が活動し、硫酸を生成してコンクリートを著しく腐食させることが分かっている。酸化タングstenは、この鉄酸化細菌に対しても極めて有効な阻害効果を有していることが実験により証明されている。

表1 曝露実験現場と曝露環境条件

曝露実験 現場の分類	気相部硫化 水素濃度 (ppm)	気相部温度 (℃)	気相部湿度 (%)	供試体設置箇所および曝露環境条件
A	15～214	22～31	86～95	高温多湿、高い硫化水素濃度、密閉、激しい下水の乱れ(分配槽気相部)
B	4～80	25～31	91～96	温泉水流入、高温多湿、密閉、激しい下水の乱れ(最初沈殿池の流出部側溝気中部)
C	6～60	18～27	71～83	汚泥処理系統、換気施設あり(汚泥貯留槽開口部から吊下げ)
D	105～360	25～35	94～98	高濃度硫化水素を溶存、高温多湿(消化槽脱離液ピット開口部から吊下げ)
E	2～21	16～28	75～90	工場排水流入(約30%)、激しい下水の乱れ(着水井開口部から吊下げ)
F	1～14	16～28	81～93	低い硫化水素濃度、ヒューム管曝露装置内(前曝気槽から取水)
G	0～0.5	11.0	—	自然流下管路
H	7～87	20.0	—	圧送管吐出し先人孔
I-1	0～378	—	—	ビルピット吐出し先人孔
I-2	0～378	—	—	ビルピット吐出し先人孔
J	0～0.5	18.4	—	自然流下管路
K	0～9	10.1	—	ビルピット吐出し先人孔
L	0～31	11.5	—	ビルピット吐出し先人孔
M-1	0.2～10.1	23.5	—	伏越し上流人孔
M-2	0～4.9	22.4	—	伏越し下流管路
M-3	3.7～8.0	22.3	—	伏越し下流人孔
M-4	1.2～8.4	20.9	—	伏越し下流管路
N	15～581	31.5	—	下水処理場の分配槽気相部

3. 防菌コンクリートの製造

防菌コンクリートは、防菌剤をコンクリートに混ぜるだけで製造される。その混和量は、図3、4に示した微生物学的実験によって得られた最小発育阻害濃度から安全率を加味し、ニッケルと酸化タングステン化合物を合わせてセメント重量に対して0.15%としている。ただし、防菌剤は粉体であるため、その混和率ではコンクリート中に均一に分散させることは困難である。そこで、製造時の取り扱いを容易にするためにセメント質材料で希釈し、セメント重量に対する混和率が1%(コンクリート二次製品では4 kg/m³)になるように調整している。

4. 防菌コンクリートの耐用年数

4-1. 曝露実験および追跡調査

この曝露実験および追跡調査(以下、本調査)は全国18箇所で行ったものであり、さまざまな曝露環境条件下での硫化水素濃度や温度などを網羅できるものである。曝露実験は、日本下水道事業

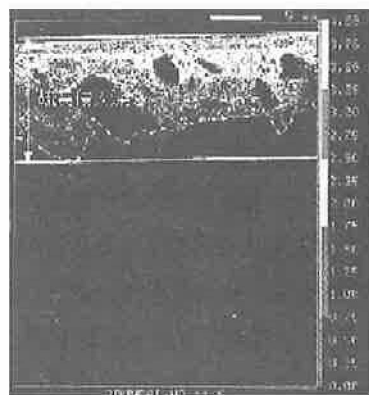


図5 EPMA分析による硫黄侵入深さの例

団との共同研究で実施した。追跡調査は、硫化水素の発生が顕著なビルピットや圧送管突出口および伏越し人孔などの供用管路から採取したコア供試体の測定データを用いたものである。本調査現場の環境条件を表1に示す。

4-2. 評価項目

本調査における腐食の評価は、腐食深さ(mm)、腐食速度(mm/年)、硫黄侵入深さ(mm)、硫黄侵入速度(mm/年)であり、腐食深さは脆弱な部分をノギスで測定したものである。また、硫黄侵

表2 調査結果

調査現場 の分類	曝露環境		防菌コンクリート					普通コンクリート				
	平均硫化 水素濃度 (ppm)	平均温度 (℃)	供用年数 (年)	腐食深さ (mm)	腐食速度 (mm/年)	硫黄侵入 深さ (mm)	硫黄侵入 速度 (mm/年)	供用年数 (年)	腐食深さ (mm)	腐食速度 (mm/年)	硫黄侵入 深さ (mm)	硫黄侵入 速度 (mm/年)
A	81.0	27.0	2.0	1.2	0.60	2.0	1.00	2.0	3.4	1.70	10.2	5.10
B	42.0	28.0	2.0	2.1	1.05	4.5	2.25	2.0	14.0	7.00	15.8	7.90
C	28.0	24.0	2.0	0	0	1.7	0.85	2.0	1.5	0.75	7.5	3.80
D	170.0	27.0	0.5	3.3	—	—	—	0.5	4.8	—	—	—
E	8.6	21.0	2.0	2.3	1.15	4.7	2.35	2.0	10.2	5.10	15.0	7.50
F	3.6	23.0	2.0	0	0	0	0	2.0	1.5	0.75	3.0	1.50
G	0.3	11.0	2.0	0	0	0	0	—	—	—	—	—
H	14.0	20.0	3.0	0	0	1.2	0.40	—	—	—	—	—
I-1	8.0	—	5.0	0	0	1.1	0.22	—	—	—	—	—
I-2	8.0	—	2.5	0	0	1.0	0.40	2.5	0	0	6.0	2.40
J	0.2	18.4	6.0	0	0	0.6	0.10	6.0	0	0	3.9	0.65
K	1.0	10.1	4.0	0	0	1.0	0.25	4.0	0	0	5.5	1.40
L	1.0	11.5	4.0	0	0	2.0	0.50	4.0	3.0	0.75	8.0	2.00
M-1	3.1	23.5	—	—	—	—	—	4.0	1.5	0.38	17.6	4.40
M-2	1.3	22.4	—	—	—	—	—	4.0	0.5	0.13	2.4	0.60
M-3	5.1	22.3	—	—	—	—	—	4.0	1.0	0.25	8.3	2.08
M-4	3.2	20.9	4.0	0	0	0.5	0.13	—	—	—	—	—
N	122.0	31.5	1.8	0.4	0.22	2.3	1.28	6.0	4.0	0.66	18.9	3.15

入深さは図5に示す元素分析(EPMA分析)によって測定した。

一般的に、腐食の測定はフェノールフタレイン法によるが、硫酸腐食の場合、中性域である二水石膏よりも深くまで硫黄が侵入することが多

い。硫黄の侵入はコンクリートの中性化や強度低下には直接影響しないものの、長期的に膨張破壊を引き起こす要因となることから、この領域を調べる方法として硫黄侵入深さをを用いた。

腐食速度と硫黄侵入速度は、腐食深さおよび硫黄侵入深さを供用年数で除して求めた。

4-3. 平均硫化水素濃度

下水道施設内のコンクリート腐食は、主に硫酸による腐食である。硫酸は硫黄酸化細菌(あるいは鉄酸化細菌)が硫化水素ガスを酸化することに



写真2 防菌コンクリート



写真3 普通コンクリート

よって生成される。そこで、下水道施設内の硫化水素濃度を計測して腐食環境とした。

硫化水素濃度の計測は、硫化水素ガスの濃度を無人で連続的に計測するデータロガーを備えた検出器(拡散式硫化水素測定器)を調査管路のマンホール内(ステップ)に吊下げて行った。また、硫化水素濃度の平均値を用いた理由は、硫化水素の発生が間欠的である場合が多いためである。

4-4. 曝露実験結果

本調査結果は表2に示す通りであり、普通コン

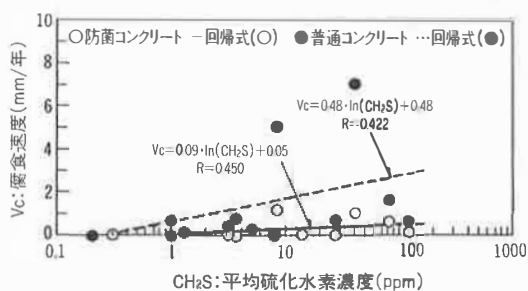


図6 平均硫化水素濃度と腐食速度の関係

クリートよりも防菌コンクリートの方が、腐食深さと硫黄侵入深さのいずれの場合においても小さいことが認められた。一例として、写真2, 3に、K地区で4年間曝露した供試体を示す。普通コンクリートは一部腐食しているが、防菌コンクリートには全く腐食は見られなかった。

4-5. 耐用年数の算定

平均硫化水素濃度と腐食速度の関係を図6に、平均硫化水素濃度と硫黄侵入速度の関係を図7に示す。図中に示した「腐食速度」と「硫黄侵入速度」の回帰式を用いて平均硫化水素濃度10ppmにおける腐食速度を試算した。防菌コンクリートの腐食速度は0.26mm/年、硫黄侵入速度は0.83mm/年と推定され、普通コンクリートの腐食速度は1.59mm/年、硫黄侵入速度は3.69mm/年と推定される。なお、平均硫化水素濃度10ppmとは、一般的な下水管路における腐食環境とされ、(社)日本下水道協会ではⅢ種の環境として定めている⁶⁾。

コンクリートの標準的な耐用年数を各部材における鉄筋のかぶり厚さまで腐食が達する年数とすると、平均硫化水素濃度10ppm以下における耐用年数は、表3に示すとおりである。例えば、防菌コンクリートにおける腐食速度(0.26mm/年)から計算したかぶりの最小値に達する期間は、スラブで一般の環境の場合、かぶりの最小値が25mmであることから、25mmを0.26mm/年で割れば96年となる。したがって、下水道施設に用いる一

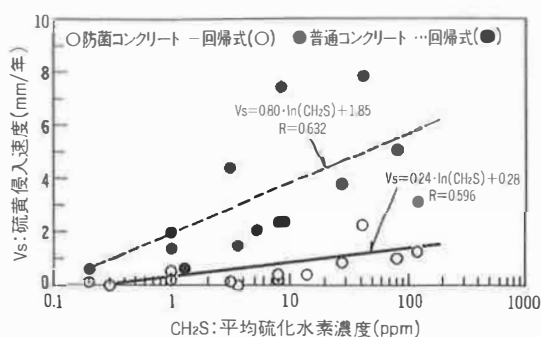


図7 平均硫化水素濃度と硫黄侵入速度の関係

般的な構造物の標準耐用年数である50年を確保することが十分に可能であるものと推測される。

また、この回帰式から、平均硫化水素濃度50ppm以下の環境における防菌コンクリートと普通コンクリートとの腐食速度と硫黄侵入速度を求めて比較すると、防菌コンクリートは普通コンクリートよりも、腐食深さが6分の1から5分の1程度、硫黄侵入深さが4分の1程度になることが推測される。

5. 防菌剤が環境に及ぼす影響

下水処理施設では、さまざまな微生物の活動によって下水処理を行っている。防菌剤が硫黄酸化細菌以外の菌の活動を阻害した場合、下水処理工程に悪影響を及ぼすことが懸念される。そこで、下水処理施設に用いられる活性汚泥について、下水実験方法の品質管理手法であるCOD生分解度により防菌剤の影響を確認した結果、防菌剤混和による活性汚泥のCOD生分解度への影響はほとんど無いことがわかっている。

また、防菌剤成分の最大溶出量や毒性などを確認するために、防菌コンクリートの溶出試験、防菌剤の変異原性試験を行った結果、溶出はほとんどなく、変異原性も陰性であった。さらに、発がん性とLD50についても特に問題ないことが確認されている⁷⁾。

表3 平均硫化水素濃度10ppm以下の腐食環境におけるコンクリートの標準的な耐用年数

部材	環境条件 ^{a)}	かぶりの最小値 (mm) ^{b)}	腐食速度から計算したかぶりの 最小値に達する期間(年)		硫黄侵入速度から計算したかぶりの 最小値に達する期間(年)	
			防菌コンクリート	普通コンクリート	防菌コンクリート	普通コンクリート
スラブ	一般の環境	25	96	16	30	7
	腐食性環境	40	156	25	48	11
	特に厳しい腐食性環境	50	194	32	60	14
梁	一般の環境	30	117	19	36	8
	腐食性環境	50	194	32	60	14
	特に厳しい腐食性環境	60	233	38	72	16
柱	一般の環境	35	136	22	42	9
	腐食性環境	60	233	38	72	16
	特に厳しい腐食性環境	70	272	44	84	19

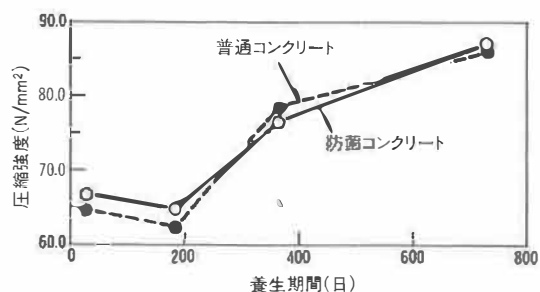


図8 供試体の圧縮強度実験結果

6. コンクリート強度への影響

防菌剤混和によるコンクリート強度への影響を確認するために、防菌コンクリート供試体と普通コンクリート供試体の圧縮強度を長期材齢で比較したものが図8である。また、双方のコンクリート供試体におけるフレッシュ性状(まだ固まらないコンクリートの性状)を表4に示した。

防菌コンクリートと普通コンクリートはともに、供試体の圧縮強度のパラッキによって、養生期間が30日よりも180日の圧縮強度の方がわずかに低いが、それ以降の圧縮強度は、養生期間の進行に伴って増進している。また、防菌コンクリート供試体と普通コンクリート供試体の圧縮強度およびフレッシュ性状には差が認められないことから、防菌剤混和によるコンクリート強度への影響は無いことを確認した。

表4 圧縮強度実験用供試体のコンクリートのフレッシュ性状

分類	スランプ (cm)	空気量 (%)	練り上がり 温度(℃)	単位容 積重量 (kg/m³)
防菌 コンクリート	9.0	1.6	16.0	2,413
普通 コンクリート	8.5	1.6	16.0	2,409

7. まとめ

前述した防菌コンクリートの研究から得られた知見やその特長をまとめると以下のとおりである。

① 硫化水素濃度が10ppm以下の環境条件下で50年以上の耐久性が確保できる。

② 硫化水素濃度が50ppm以下の環境条件下では、普通コンクリートに比較して、腐食深さは6分の1から5分の1程度、硫黄侵入深さは4分の1程度に抑制することができる。

③ 他の微生物や周辺環境などに及ぼす影響は生じない。

④ 防菌剤混和によるコンクリート強度への影響は無い。

⑤ コンクリートの製造時における防菌剤の取扱いは、混和剤と同様である。

以上のことから、防菌コンクリートは下水道や

下水処理施設等の腐食劣化や、これに伴った道路陥没などの社会問題を解消できる環境保全型のコンクリートといえる。

防菌コンクリートは開発後13年を経過し、ビックリート製品と命名してからその実績は累計13万tにも及ぶ。平成15年には(財)下水道新技術推進機構の建設技術審査証明を更新し、平成16年には(社)日本下水道協会のⅡ類資器材認定を取得した。今後、防菌コンクリートによってコンクリート構造物のライフサイクルが延びることで、社会資本におけるコストの低減とその有効活用にも貢献でき得るものと考えられる。

[参考文献]

- 1) 木下 勲/下水道管のコンクリート腐食、セメント・コンクリート、No.577, Mar.1995
- 2) 中本 亮, 吉本国春, 沼野良介, 浦上良樹/終末処理場におけるコンクリート施設の腐食, 劣化のメカニズムと防止対策, 下水道協会誌, Vol.27, No.313, 1990年6月
- 3) 杉尾 剛, 前田照信/コンクリート腐食に関与する微生物, BIOINDUSTRY Vol.13, No.2, 1996.2
- 4) 日本下水道事業団, (財)下水道業務管理センター/下水道構造物に対するコンクリート腐食抑制技術及び防食技術の評価に関する報告書, 平成13年3月
- 5) Robert L. Islander, Joseph S. Deviny, Florian Mansfeld, Adam Postyn, and Hong Shin/Microbial Ecology of Crown Corrosion in Sewers, Journal of Environmental Engineering, p.751, Vol.117, No.6, 1991
- 6) (社)日本下水道協会/下水道管路施設腐食対策の手引き(案), 平成14年5月
- 7) (財)下水道新技術推進機構/建設技術審査証明(下水道技術)報告書, ビックリート(防菌コンクリート), 2004年3月
- 8) 土木学会編/コンクリート標準示方書[構造性能照査編], p.99, p.119~122, 2002年制定

HOT NEWS on Cement & Concrete

■JCI賞決まる

日本コンクリート工学協会は5月19日、2006年度の日本コンクリート工学協会賞を決定・発表した。論文賞4, 技術賞3, 奨励賞5, 作品賞2件で、受賞者は以下のとおり(順不同, 敬称略)。

論文賞

高強度RC部材の復元力特性および力学特性に関する一連の研究(石川裕次, 木村秀樹/竹中工務店), Development of Simulation Model of Chloride Ion Transportation Cracked Concrete(加藤絵万/港湾空港技術研究所, 加藤佳孝, 魚本健人/東京大学), Simulation of Corrosion Processes and Structural Performance Assessment of Corroded RC Members(K.Toongonthong/大成建設, 前川宏一/東京大学), コンクリートの環境負荷評価手法に関する研究(河合研至/広島大学, 杉山隆文/北海道大学, 小林孝一/中部大学, 佐野 奨/太平洋セメント)

技術賞

ASR劣化橋脚のPC鋼材巻き立て工法による補強とモニタリング技術の開発(石井浩司/ピーエス三菱, 奥田由法/アルスコンサルティング, 谷川 伸/東亜合成, 鳥居和之/金沢大学), プレキャストECC連結梁を用いた高層RC新架構(丸田 誠, 関田徹志, 永井 覚, 山本幸正/鹿島建設), 超高強度繊維補強コンクリートを用いた

国内初の道路橋-東九州自動車道堀越Cランプ橋(黒岩 正/西日本高速道路, 岩崎郁夫, 大熊 光/大成建設)

奨励賞

水平2方向地震入力を受ける偏心建物の非線形地震応答推定手法に関する研究(藤井賢志/東京理科大学), 不確実性および材料非均質性のリスク評価による検査計画策定方法に関する研究(加藤佳孝/東京大学), 近赤外分光法のコンクリート調査への応用(金田尚志/東京大学), 水和反応モデルに基づく若材齢コンクリートのモデル化(丸山一平/名古屋大学), 湿式選別法によるコンクリート廃材の全量リサイクル技術(松村 宇/北海道立北方建築総合研究所)

作品賞

愛知県豊田市「矢作川橋」(猪熊康夫, 寺田典生/中日本高速道路, 堀 吉和/鹿島建設, 関口富夫/オリエンタル建設), 大阪府枚方市新町2丁目300-1他「関西医科大学附属枚方病院」(角 彰, 西村 章, 光枝 良, 上田博之, 奥出久人, 前川元伸/竹中工務店)

表彰式は同日、東京・永田町の全共連ビルで行われた。

なお、作品賞を受けた矢作川橋の概要は、No.701(2005年7月号)を参照されたい。

【70ページに続く】