特集・第6回生物膜法研究シンポジウムより

砂浜の機能を有する多孔質コンクリートへの 生物付着と水質浄化

玉井 元治*・河合 章**・来田 秀雄**・矢持 進***

1. ま え が き

わが国の大都市圏を後背地にもつ多くの湾岸部では、沿岸域の埋め立て等に伴って、自然海岸は年々少なくなっている。大阪湾を例に挙げれば、総延長260kmの海岸線の95%は人口海岸で占められ、その約7割はケーソンやコンクリート等の垂直護岸となっている¹⁾。このような垂直護岸は渚線を保つ砂浜に比べ水域における生態系の多様化を減退させ、水質の自然浄化作用を含む生物環境を悪化させている。

本研究は水域の自然浄化を推進することを目的に、生物環境を早期に再生する可能性の高い、連続した空隙を有するコンクリート（まぶしコンクリート：No-Fines Concrete：NFC）の内部表面積の算定等2～3の性質と、それへの海洋生物の付着性状および水質浄化能について調査し、NFCが沿岸水域の環境保全用の材料として利用可能であることを前報²⁾に引き続き示唆するものである。

筆者らは既にNFCの連続した空隙を得る配合条件を与え、各条件と透水性との関係を明らかにし³⁾、また高性能減水剤や活性シリカを結合材に添加し、高強度化等の機械的性質と凍結融解に対する耐久性の向上を計ることに成果を得た^{4)～6)}。

この種の硬化体を海面付近から海面下約4m迄に沈漬すると、凹凸のおおきい表面は勿論のこと、内部の連続空隙に海水が浸入・浸出し、それぞれの表面が早期に中性化すると共に海水中に棲息する微生物が付着・繁殖し、生物膜層を形成することを確認した^{7)～10)}。その結果、海水中の有機物を分解し無機化を進行させると同時に、新たに藻類や着生動物並びにそれらの表面に付着する微生物の棲息を早め、海域の生物環境を早

期に良好ならしめることが期待される。

生物膜を利用した水処理法は回転円板法に代表されるように、主としてプラントに組み込まれ、既に広く実用に供されている。本研究は生物膜法の自然な海域に対する適用例と見做すこともできる。

これまで筆者ら¹¹⁾は大阪湾における「渚線の環境構造とその役割に関する調査研究」において、ケーソンおよびコンクリート垂直護岸、消波テトラポットならびに砂浜に棲息する細菌群、即ち有機物分解過程、アンモニアを硝酸塩に酸化する硝化過程など、種々の生化学活性をもった細菌群を測定し計数した結果、鉄板およびコンクリート表面の1cm²に棲息する細菌数は、渚線の砂1g当たりの細菌数とほぼ同じであることを明らかにした。まだ定量的に確認されていないが、水質浄化に寄与する微生物の棲息数の多い砂層厚さは数10cmである。従って、ある水深までの単位水平透視断面当たりで考えると、垂直岸壁よりもテトラポット、さらに砂浜のほうが、はるかに菌数が多く、渚線の環境浄化機能の面から砂浜が最も優れていることを明らかにしている。

2. NFCの空隙率と内部の表面積

沿岸海域の砂浜の砂に付着する微生物量は、 $10^5 \sim 10^7$ cells/cm²とされ、これらの微生物は干満差や波によって砂の間に流入する海水を自然浄化することに大きく関与している。

NFCの硬化体内を海水が自由に流入通過し、流入する水と共に多くの酸素を供給し、空隙内を好気性雰囲気とするためには、均等にして出来るだけ大きな連続空隙（Funicularの第1領域：F-1領域）が形成されている必要がある。また水中のBODやCODを内部表面に付着した生物膜層で低下させる能力は、NFC中に形成された表面積に比例するものと考えられる。Table 1は球の充填モデルと空隙率につき一般の

* 近畿大学理工学部 Motoharu TAMAI

** 農学部 Akira KAWAI, Hideo KIDA

*** 大阪府立水産試験場 Susumu YAMOUCHI

Table 1 Packing model and void ratio of glass ball

Packing model		Number of contact point	Void ratio(%) without filling	30% of the voids filled with paste (F-1),	Void ratio (%), critical point of (F-2) range,	Largest radius of independent air (R')
Simple cubic		6	47.64	33.35	19.75	0.723R
Simple stagger		8	39.54	27.68	8.89	0.528R
Schematic explanation of filling condition of voids						

Note ; F-1 : First range of funicular, F-2 : Second range of funicular

Table 2 Specimens and interior surface area of NFC (30% of the voids filled with paste)

Packing model	Ball size (mm)	Interior surface area (cm ² /ℓ)			Thickness : 10cm specimen	
		0 % *	F-2 **	30 %	interior S.A.(cm ²) *	ratio of surface area ***
Simple cubic	10	3141	1642	2373	21,357	23.73
	5	6282	3284	4746	42,714	47.46
Simple stagger	10	3627	1011	2615	23,535	26.15
	5	7254	2022	5230	47,070	52.30

S.A. : Surface area, * 0 % filling, ** At the critical point of F-2, *** interior S. A./exterior S. A., *30×30×10cm specimen

充填形式である立方格子 (Simple cubic) および斜方格子充填 (Simple stagger) の個々の内部空隙に接する球の直径と Funicular の第2領域 (独立空隙となる領域) における最大独立球の直径とそれぞれの空隙率を示した。

連続空隙を持つ NFC の表面積は次の方法によって算出した。(Table 2 参照)

NFC の骨材は球と仮定し、その直径はそれぞれ 5 および 10mm とし、充填形式は立方格子と斜方格子充填とした。結合材がない場合の骨材表面積は、それぞれ球の充填個数から求めた。結合材を増加させ次第連続空隙がなくなり、独立空隙に移行する直前の内部表面積は、独立空隙の個数とその直径 (R') から算出した。連続空隙を持つ NFC の表面積は、前述の 2 つの極限值から空隙率の関数とし線形式で補間し所定の空隙における値を推算した。各充填状態の骨材空隙に、結合材により 30% 充填 (実質空隙率 : 33.35%, 27.68% となる) した場合の 10×10×10cm 立方体当たりの連続空隙の表面積を示す。厚さ 10cm の普通コンクリートの表面積と同寸法の NFC の内部連続空隙の表面積比を示した。この結果によれば、斜方格子充填として球の直径が 5mm の球状骨材を用いた 10cm の版の NFC と普通コンクリートとの内・外部の表面積比は、52.30 倍となる。

このように NFC を用いることにより、水に接するコンクリートの表面積は数十倍にもなることが分かる。

3. 実験の概要

(1) NFC の性質

セメントは O_N 社製の高炉 B 種セメントを、高性能減水剤は K 社製のナフタリン系物を用い、骨材は 6 号と 7 号碎石を用いた。NFC の配合は、透水性と内部表面積の拡大を考慮して碎石自体の空隙に対し結合材の充填率を 30% とした。本実験に用いた普通コンクリートと NFC の性質を Table 3 に示す。

(2) 付着生物調査用供試体とその取り扱い

普通コンクリートと NFC への付着生物試験用供試体は、Fig. 1 に示すように大型供試体 (100×200×20cm) 内に上中下の 3 点を決定し、それらの寸法は 20×20×14cm である。調査の主目的は海面からの位置の違いが生物付着に与える影響である。なお大型供試体の沈漬場所は大阪泉佐野漁港北岸壁の前面とし、海水中への沈漬期間は 86 日間とした。

(3) 生物試料の分取

a) 供試体表面を対象とする場合

大型海藻と貝類が該当し、肉眼的に採取できるものをピンセットにより剥ぎ取り、分析試料に供した。

b) 供試体表面の細菌群の採取

Table 3 Properties of normal concrete and NFC

Kind of specimen	Compressive strength (MPa)			Void ratio (%)	K* (mm/sec)
	7days	28days	91days		
Normal concrete	23.6	39.3	48.3	—	—
NFC (No. 6)	8.4	10.5	11.7	30.1	16.2
NFC (No. 7)	8.5	12.8	13.4	31.7	11.5

K* : Coefficient of water permeability
W/C : Normal concrete = 50%, NFC = 25%

Fig. 1 Size of specimen and its setting to sea

好気性従属栄養細菌の採取は、コンクリート供試体の中央部表面に 5×5 cm 中空の殺菌シリコンゴムを当て、付着物を吸引式付着細菌採取器によって捕集した。
c) 供試体内部の細菌群の採取

NFC 供試体を圧縮法により骨材粒大となるまで破壊し、その細片に滅菌水を加えて十分に振盪したものを用い細菌群を採取した。

d) 水質変化の調査

大型供試体から取りだした各 H, M, L の分析用供試体は、海水の浄化に対し細菌群の働きを明瞭にするため表面に付着する大型生物の大部分を除去し、容積 12L の水槽に挿入した。その後供試体が完全に浸るよう海水を注入し、かつ海水を循環させる方法によって現場水温を保持し実験を行った。また NFC の内部空隙に滞留する海水の交換を計るため、および試水の溶存酸素濃度が極端に低下することを避けるため、供試体を実験水槽から空中に上げ空隙内の海水を排出した後、直ちに浸漬する操作を 10 分毎に繰り返した。水質の変化は注入時の海水の性状と一定時間経過後における性状の差から求めた。

4. 生物付着試験結果

(1) 目視観察

海洋生物の付着は、設置（7 月）後 14 日程度で NFC の試料表面にアオサ類の幼体付着が全面にみられたが、普通コンクリートのそれは $\frac{1}{3}$ 程度であった。1 か月経過するとアオサ類が成長すると共に微小動物植物からなる生物膜が形成され、散在的にホヤ類の幼体付着がみられた。

3 ヶ月後、設置した試料には上面がアオサ類とエゾカサネカンザシに被われ更に L 部にはホヤ類が付着し、厚い生物膜に被われていた。

Table 4 Periphytic bacteria (cells/cm²)

Bacteria group	Layer #	Normal concrete surface	No-fines concrete	
			Exterior surface	Interior surface
Total aerobic heterotrophic bacteria	H	2.2×10^5	1.0×10^5	5.1×10^4
	M	2.3×10^5	1.1×10^5	3.8×10^4
	L	1.1×10^5	4.0×10^5	1.4×10^5

Intertidal zone (H : upper ; M : middle ; L : low)

(2) 細菌群の付着状況

Table 4 は、各供試体に付着した細菌群のうち主として有機汚濁物質を好気域で分解する好気性従属栄養細菌を定量培養した細菌数を示す。この結果から、好気性従属栄養細菌は普通コンクリート、NFC（6 号砕石）の表面にはいずれにも早期にかつ渚線の砂と同じ程度 ($\times 10^5$ cells/cm²) 多量に付着しかつ NFC には表面のそれよりやや少ないが内部にも付着することを示している。なお H, M, L の深度による付着の相違は、表面内部ともこの結果の範囲では判定困難である。

5. 水質の変化

Table 5 は付着した細菌群の働きによる水質の変化として硝酸態窒素量と溶存有機炭素量の変動を示したものである。硝酸態窒素量はいずれの供試体においても初期値と比較して 1.5 時間後には高い値を示した。NFC では 6 号、7 号砕石を用いたいずれも普通コンクリートと比較して硝酸態窒素の生成が多くみられ、また設置した水深の違いによる硝酸態窒素生成は、潮間帯の上部や中部に設置したものでは多く、潮間帯よりもさらに少し下部に設置して常に供試体が海中にあったものでは少ない傾向がみられた。

溶存有機炭素量の変動は初期値と比較して 1.5 時間後、普通コンクリートでは増加したが、NFC の場合

Table 5 Changes of water quality ($\mu\text{g at./l}$)

Specimen	Class of crushed stone	Layer*	Nitrate-N		Dissolved organic carbon	
			Incubation time (hr)			
			0	1.5	0	1.5
Normal concrete	—	H	26.1	34.6	225	258
		M		37.5		276
		L		37.9		250
No-fines concrete	No. 6	H	26.1	48.5	225	119
		M		49.4		131
		L		44.4		169
	No. 7	H	26.1	46.8	225	180
		M		50.5		197
		L		38.9		182

* Intertidal zone (H : upper ; M : middle ; L : low)

は減少した。NFCのうち骨材粒径の相違による影響をみると、7号と比較して6号碎石を用いたほうが減少が大きく、また潮間帯上部に設置した場合、減少傾向が顕著に見られた。

6. 結 論

- 1) NFCの内部表面積は結合材の充填率に依存するが、厚さ30cmの板を作成すると実用範囲において普通コンクリート面の100倍程度となり、内部表面への微生物付着を計ることができる。
- 2) 細菌群による有機物の無機化、さらには魚類等の動物にとって有害なアンモニアから無害な硝酸に変換する硝化作用は、普通コンクリートでは表面のみであるのに対しNFCは内部空隙の表面も有効に働くことを示唆した。
- 3) NFCを垂直護岸の渚線付近に設置すると、ある程度砂浜の機能を有する材料として、また海岸域の生物環境育成材料として利用可能と考えられる。

謝辞：今回の実験に際しNFCの製作は前田製管(株)に、また海洋への大型供試体の沈漬やその管理は寄神建設(株)に御協力をお願いした。関係各位に深甚の謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 大阪府水産試験所；大阪の渚，大阪府1990。
- 2) 玉井元治，西脇裕二；連続空隙を有するコンクリートを用いた水質浄化の可能性，環境技術，Vol.20, No.3, pp.28～31, 1991。
- 3) 玉井元治；連続空隙を有する固体化の透水性，セメント技術年報，42, pp.591～594, 1988。
- 4) Tamai, M. ; Propertis of No-fines Concrete with Superplasticizer, Pacific Concrete Conf. Proc., Vol. 2, pp. 483～492, 1988。
- 5) Tamai, M ; Properties of N. F. C. Containing Silica Fume, ACI SP-114, pp.799～814, 1989。
- 6) 玉井元治；まぶしコンクリートの動弾性係数と耐久性，セメント・コンクリート論文集，No.43, pp.376～381, 1989。
- 7) 玉井元治；連続空隙を有する硬化体の性質と水質浄化への利用，月刊「水」，Vol.32, No.13, pp.22～27, 1990。
- 8) 玉井元治，河合章，西脇裕二；ポーラスコンクリートへの海洋生物付着に関する研究，セメント・コンクリート論文集，No.44, pp.708～713, 1990。
- 9) 玉井元治，河合章，西脇裕二；ポーラスコンクリートに付着する海洋生物の変化，第45回セメント技術大会講演集，pp.340～345, 1991。
- 10) 古川憲治，中川雅世，藤田正憲，他；多孔性コンクリートブロックを用いた開水路の浄化機能に関する研究，日本水処理生物学会誌，No.6, 1991。
- 11) 河合章，他；渚線の環境構造とその役割に関する調査研究，大阪府，1991。

海外環境情報

英の Ecossensors 社、排水中の重金属測定 使い捨てセンサーを開発

Throwaway sensors to test heavy metal water pollution
H25101357

排水中の重金属濃度を電気化学的に測定できる使い捨てセンサー電極を英国の Ecossensors 社が開発した。試作品については、排水中の鉛、カドミウム、亜鉛、銅の濃度を ppb オーダーまで測定できることがすでに実験室的に確認されている。

同社では、英政府の SMART 補助金をうけ、試作品を現場用バージョンに改良するとともに、だれにでも使いやすいはん用ポータブル型を製作し、さらに使い捨てカートリッジ電極型オンライン・バージョンを開発する計画である。このセンサー電極が現場に実用

化されると、実験室で水質分析を行う必要がなくなる。また、飲料水、血液などの液体中の重金属測定にも使用できる。

電極（1 cm²）はPVC基質と炭素膜で構成されている。厚さ4 μmの導電性物質を被覆し、レーザー加工によって約10万本の微細孔を設けて炭素膜まで導通し、最終的に水銀膜仕上げを施している。電極を排水中に浸せきし、これに負の電圧を加えると、汚濁物質は水銀側へ移動し、正の電圧を加えると、重金属イオンは溶液中に押しもどされる。そのときの電流値から汚濁物質の濃度を算出することができる。

同社の予想によると、このセンサーはかなりの需要が見込まれ、英国だけでも年間売上は数百万ポンドに達するものとみられる。

B0477 A Engineer (Lond) 273 (7069) 54 (Sep. 19, 1991)

(日本科学技術情報センター許可第文0321号)