

多孔性コンクリートを用いた河川浄化に関する研究

田中 光徳*¹ 岡林 悦子*²

A Study on Purification of Rivers with NO-Fines Concrete

*¹Mitsunori TANAKA *²Etsuko OKABAYASHI

Although the environment of rivers has recently been gradually improved by the extension of sewage systems, the rivers have been still increasingly polluted by domestic non-fecal drainage, unregulated industrial drainage and others in undeveloped areas. Meanwhile, a strong tendency to regenerate the intrinsic hydrophilic function of river as an urgent environmental issue is seen even in urban districts. It is, however, difficult not only to improve the river water but also to develop the water's edge environment for producing hydrophilicity and comfortableness only by the existing water-purifying methods. It is, therefore, considered useful to utilize a water-purifying method making efficient use of the natural purification function of plants and bacteria together with them. This study has been made to expect the effects of open cell foamed NO-Fines Concrete (NFC) as a contacting material which is grown about with bacteria for adsorbing and oxidatively destructing pollutants in river water by using together with conventional water's edge structures absolutely for durability.

This paper presents the characteristics of binder and strength properties of NFC compared with those of ordinary concrete.

1. 諸 言

近年における下水道の普及は、河川環境を徐々に改善の方向に向かわせつつあるも、未整備地区においては依然として生活雑排水、未規制事業排水等による汚濁の進行は顕著である。

一方、都市化の進んだ河川においても河川の本来有する親水機能の再生を最も身近な環境問題として捉える気運の高まりから河川の再生策が急がれている。このような河川の水質改善とともに、親水性、快適性を併せもつ水辺環境を創出するためには既存の水質浄化法のみでは解決は困難である。

そのためには、植物、微生物等が持つ自然浄化機能を十分に活用した浄化法との併用が有効と思われる。

本研究においては、従来から耐久性一週倒の水際構造物に、連続した空隙を有する多孔性コンクリート

(No-Fines Concrete : NFC) を併用することで、付着微生物を増殖させ、付着微生物によって汚濁物を吸着、酸化分解させる接触材としての効果を期待するものである。シリーズの内、本編は普通コンクリートと対比した NFC コンクリート用結合材 (バインダー) の特性および NFC コンクリートの強度特性につき検討したものである。

2. NFC のバインダー条件

2. 1 セメントペーストのレオロジー特性

NFC は、粗骨材にセメントペースト (C. P) をまぶしたものであり、連続する空隙は、水の自由移動による酸素の供給を促し、空隙内を好気性雰囲気とすることが考えられる。また表面の性状、連続空隙の大きさも微生物の生息環境を左右する因子と考える。従って、連続空隙を生み出すコンクリートとするには、バインダーに次の様な条件を持たせる必要がある。それは、バインダーのコンシステンシーが大き過ぎると、施工時にバインダーが流下し、まぶし厚の均一化をはかることが難しく、また、小さ過ぎ、塑性化すると剝離等

*¹*² 土木工学科 (第一工業大学環境衛生開発研究所)

本文は 1993. 3 土木学会 (西部) 研究発表分に追加実験し取り纏めたものである。

Table 1 Rheological filling pattern

Filling Pattern	Pendular range	Funicular range		Capillary range	Slurry range
		F-first range	F-second range		
Solid phase	continuous	continuous	continuous	uncontinuous	uncontinuous
Liquid phase	uncontinuous	continuous	continuous	continuous	continuous
Air phase	continuous	continuous	uncontinuous	0	0
Condition					

Table 2 Packing model of void ratio

Packing model	Number of ball contact point	Void ratio (%)	Largest radius of independent air	void ratio of critical point (F-2), (%)
Most coarse	4	66.00	—	—
Simple cubic	6	47.64	0.723R	19.75
Simple stagger	8	39.54	0.528R	8.89
Double stagger	10	30.19	0.471R	7.70
Pyramidal	12	25.95	0.414R and 0.225R	5.25 (6.50)
Most dense	12	25.95	0.225R	1.25

を生じ、粗骨材を均質にまぶすことは不可能となるからである。従って、粗骨材に付着するまだ固まらないペーストの特性をレオロジカルな面から検討し、同時にペーストの最適コンシステンシーの範囲を決定する必要がある。

多孔性コンクリートの充填条件は、表1に示すように、骨材を固相 (Solid phase)、セメントペーストを液相 (liquid phase)、空隙を気相 (Air phase) とすると、連続空隙を形成させる各相の構成条件は、固相、液相、気相がそれぞれ連続する Funicular の第一領域 (F-1) とすることが最も条件として優れている。しかし、固相と液相が連続で、気相のみが独立する、Funicular の第二領域 (F-2) が (F-1) 領域に包含される場合もその条件に該当するものと考えられる。通常、均等係数の高い砕石を普通の締固め状態で充填した場合の空隙率は、48 ~ 40% の範囲となる。これら粒状骨材に粘稠なセメントペーストをまぶした NFC の臨界空隙率を、近畿大学工学部玉井元治教授は、各種充填モデルから算出した値として、表2を提案している。

骨材使用 NFC の充填形式は等球径の粒子を立方格子充填 (空隙率 39.54%) とした場合と、斜方格子充填 (空隙率 39.54%) とした場合の混合系と位置づけたもので、連続空隙状態 (F-1) の空隙をセメントペーストによって 40% 充填した場合、および独立空隙状態 (F-2) に移行する最大空隙径と空隙率

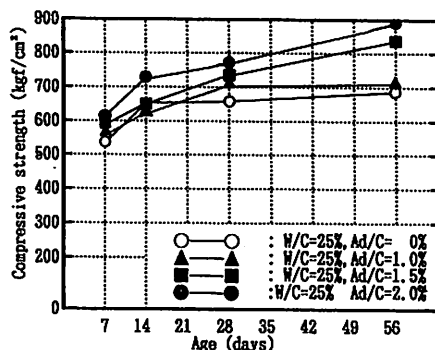


Fig. 1 Relationship between Compressive strength and age of Cementpaste

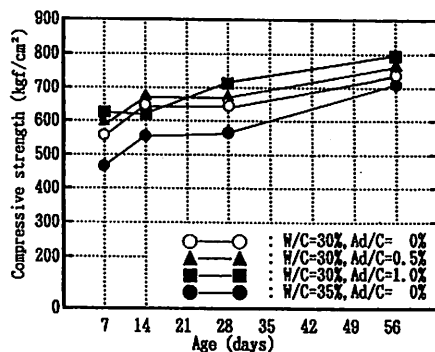


Fig. 2 Relationship between Compressive strength and age of Cementpaste

を求めたものである。表2から空隙率が立方格子充填では19.75%、斜方格子充填では8.89%以上なければ連続空隙が形成されていないことを示し、独立空隙径の最大半径は、球の半径をRとして、それぞれ0.723R、0.528Rとなることを示している。

従って、単粒子径の骨材を用い、連続空隙を形成させる条件は、20%以上の空隙を保持する粒度、配合の調整が必要である。

また、W/C = 38 ~ 52%におけるペーストのレオロジー量は過去の研究から、降伏値 (τ_y) が $10^2 \sim 10$ dyne/cm²、塑性粘度 (η_{pl}) が 35 ~ 15 Poise 程度と見做すことができる。ここに示すレオロジー量に対応する W/C の選定には、NFC に使用する骨材の空隙の大きさや、その量に依存するものとして、近似的に、空隙の平均を基準とするべきである。

空隙平均が小さい場合は τ_y , η_{pl} を小さくしなければならず、大きい場合には大きくする必要がある。従って W/C = 60% のニートセメントペーストを用いた NFC では、 τ_y は 3 dyne/cm², η_{pl} は 6 poise 程度となり、骨材への付着が悪く NFC 化することが難しくなる。しかし、粘性増加剤として少量のベントナイトを混入させると、ペーストの τ_y , η_{pl} はいずれも著しく上昇し、適用範囲に移行させることができる。逆に、W/C が 30 ~ 25% の場合には、ペーストは塑性化し、粗骨材に付着し得ない剝離状態となる。しかし、この状態のペーストには高性能減水剤 (Ad) を Ad/c = 1.0 ~ 2.5% 添加すると、コンシステンシーは改善され、所望のレオロジー量を有するペーストに改良することが可能となる。

以上の点と、筆者等の過去の研究とから、ニートセメントペースト、W/C = 38 ~ 52% において、最適コンシステンシーに相応する塑性粘度の範囲を、剪断ひずみ速度 30 sec^{-1} では 20 ~ 40 poise, J. ロートによるフロー値で、7 ~ 13 秒, JIS-A-5210 によるテーブルフロー値で 230mm が妥当な値とすることができる。

従って、NFC の W/C を 38 ~ 52% (結合材と碎石の練混ぜ時と、打設後における結合材の分離への抵抗性を考慮した値) とするとし、高性能減水剤の適切な使用によって、粘性を制御する方法を採る。

W/C = 25% では、Ad/c を 1.5 ~ 2.0%, W/C = 30% では Ad/c を 1.0% 前後、さらに W/C = 35% では、Ad/c を 0 ~ 0.5% 添加することによって、NFC 空隙制御も可能となるものと思われる。

Table 3 Mix proportions of NFC

Mixing ratio of aggregate	B/V (vol.)	30%	40%	50%
No7 Crushed stone	B/G (wt.) %	20.41	27.22	34.02
	B/G (vol.) %	13.65	18.20	22.75
	B (l/m ³)	136.5	182.0	227.5
	G (kg /m ³)	1446.1	1446.1	1466.1
	W (kg /m ³)	57.00	76.00	95.00
	C (kg /m ³)	237.51	316.67	395.84
No5, 6, 7 (wt.) ratio 5 : 1 : 4	Ad (kg /m ³)	4.75	6.33	7.92
	B/G (wt.) %	17.94	23.93	29.91
	B/G (vol.) %	12.00	16.00	20.00
	B (l/m ³)	120.0	160.0	200.0
	G (kg /m ³)	1614.0	1614.0	1614.0
	W (kg /m ³)	50.11	66.81	83.52
W/C=25% Ad/c=1.0% No5 (20~13mm) No6 (13~5mm) No7 (5.0~2.5mm)	C (kg /m ³)	208.80	278.39	347.99
	Ad (kg /m ³)	4.18	5.57	6.96

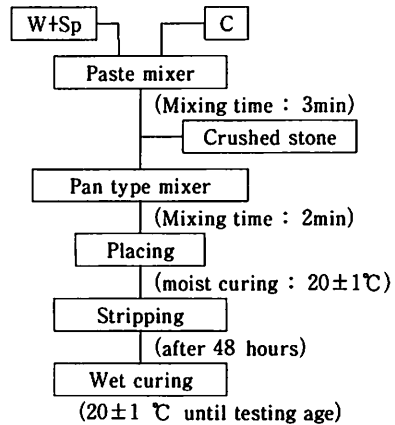


Fig 3 Mixing and fabrication of the specimen.

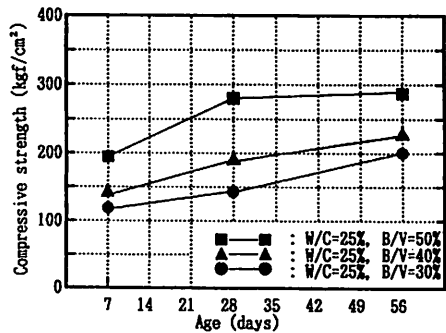


Fig 4 Relationship between Compressive strength and age of NFC using Crushed stone

2.2 セメントペーストの強度特性

NFCの強度は、骨材とセメントペースト量が一定の場合、硬化したペーストの諸特性に負うところが大きい。従って、Ad/C等の値を変えた材令と圧縮強度の関係をJISモルタル法により試験した、図1、図2にその結果を示す。一般に、C/Wと圧縮強度の関係は、一次的な変化を示す。圧縮強度を上昇させるには、W/Cをできるだけ小さくとる必要がある。

従って、W/C = 25%を一定とし、Ad/Cを0～2.0%まで変化させた場合の材令と圧縮強度の関係を示したものが図1で、W/C = 30%、35%としたものが図2である。各図から、圧縮強度はW/C = 25%、材令が28日で、690～770kgf/cm²となり、高性能減水剤添加に比例して上昇する傾向がみられる。

またW/C = 30%では、620～705kgf/cm²、W/C = 35%では570kgf/cm²、と当実験においても圧縮強度はC/Wに比例することを示している。また材令7日～56日とした強度変化は、いずれも材令の進行に伴って上昇する傾向を示す。材令が7日から52日の上昇率は、W/C = 25%、Ad/C = 0.15、2.0%の場合、それぞれ30、43、44%となり、この添加範囲では、Ad/Cは比例する傾向を示す。W/C = 30%での上昇率は20～23%とやや低い値となった。

従って、NFCに使用するセメントペーストは骨材への付着性、分離性、強度特性等を考慮して、W/C25%、Ad/C = 1.0～2.0%近傍として、コンシステンシーの管理をすることが適切と考えられる。

3. NFCの強度特性

NFCの強度は、使用骨材の粒径、粒度、付着する結合材の性質およびその量に左右されるものと思われる。従って、結合材に高性能減水剤を添加したセメントペーストとし、同時に所要のコンシステンシーを維持し得る最も低いW/Cの値を求めるため、次の要領で強度試験を実施した。

3.1 NFCの配合

NFCの配合を表3に示す。W/Cを25%、Ad/Cを1.0%とし、骨材を7号碎石(5.0～2.5mm)のみとした場合、5号碎石(20～13mm)、6号碎石(13～5mm)、7号碎石をそれぞれ重量比で5:1:4に混合した碎石の場合、また結合材と粗骨材の空隙の割合(B/V)を30%、40%、50%とした配合を求め材令と強度の関係を求めた。

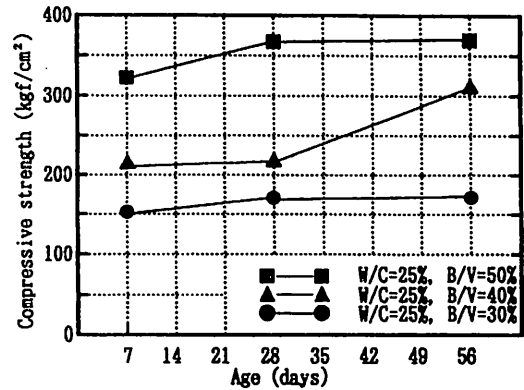


Fig. 5 Relationship between Compressive strength and age of NFC using Crushed stone

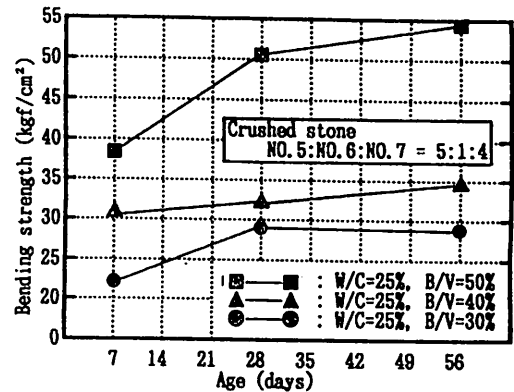


Fig. 6 Relationship between Bending strength and age of NFC using Crushed stone

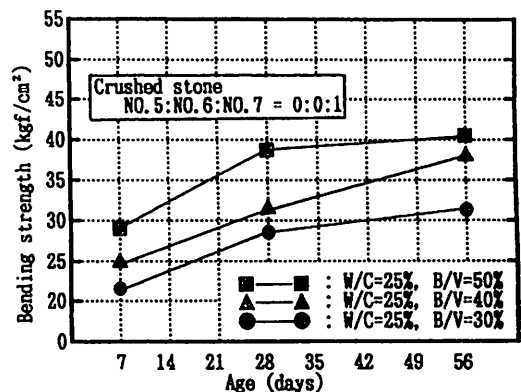


Fig. 7 Relationship between Bending strength and age of NFC using Crushed stone

3. 2 NFC 供試体の作成と養生

供試体の製造は、本研究においては、図3に示す様に、バインダーは水、混和剤、セメント（普通）をペーストミキサーにより3分間攪拌し、その後所定量の碎石（表乾状態）をパン型強制ミキサーを用い3分間混練する分離法を用いた。

NFCの打設厚は、各供試体ともに10cm迄にとどめΦ16×50cm突棒法と、表面振動バイブレーター（表面圧力：0.6～0.7kgf/cm²）法により、締固め、特に角柱供試体は2層結め、2層バイブレータにより作成した。供試体養生は、打設後48時間空中湿布養生とし、以降、試験材令日迄水中養生を行った。

3. 3 強度試験法

供試体の強度試験法には、圧縮強度および引張強度試験ともに円柱供試体を用い、Φ10×20cm、Φ15×30cmとした。曲げ試験供試体には、10×10×40cm、角柱供試体を用い各試験法は、JIS A1108（圧縮）、JIS A-1106（引張）、JIS A1113（曲げ）に準じて実施した。

3. 4 強度試験の結果と考察

1) 圧縮強度試験

W/C = 25%, Ad/C = 1.0%, 使用骨材7号碎石（NO.7）とし、B/Vを30%, 40%, 50%, 材令7日, 28日, 56日の圧縮強度の結果を図4に示す。W/C25%のペーストを用いると、B/V = 30%においては7日強度、125kgf/cm²から56日強度185kgf/cm²と強度の上昇が期待できる。

またB/V = 40%では、145kgf/cm²～220kgf/cm² B/V = 50%では200kgf/cm²～275kgf/cm²と一層の強度を望むことができる。

前述と同じ手法で、混合碎石を用いて行なった結果が図5である。圧縮強度は一層増大し、B/V = 30%では160～185kgf/cm²、B/V = 40%では225～315kgf/cm² B/V = 50%とすると、330～375kgf/cm²の値を示した。

また、材令の進行による強度の伸び率は、7号碎石を用いた配合が大きな値を示した。圧縮強度は、骨材の粒度に反比例するのが一般的であるが、それは単体の体積当りの骨材接点数が急激に低下することが原因と考えられる。従って、必要な導入空隙範囲内で、B/Vを増大させ、骨材自体の密度を高める複合配合（混合）が強度面においては有利となる。

2) 引張強度試験

引張強度試験の結果を示したのが図6である。

7号碎石では、15～30kgf/cm²、混合碎石においては、18～38kgf/cm²となり、B/Vによる変化の影響が大きいことがわかる。

また脆度係数（圧縮強度の引張強度に対する比）は、7号碎石の場合、8.0～9.0、混合碎石では、8.5～10.0となった。NFCの引張強度は、フリージングがないことや、骨材と結合材との付着が良いことなどから強度比は大きい値となる。

3) 曲げ強度試験

曲げ強度の結果を示したのが図6、図7である。7号碎石では、22～40kgf/cm²、混合碎石では25～50kgf/cm²となり、引張強度と同様にB/Vと骨材配合の影響が大きいことがわかる。

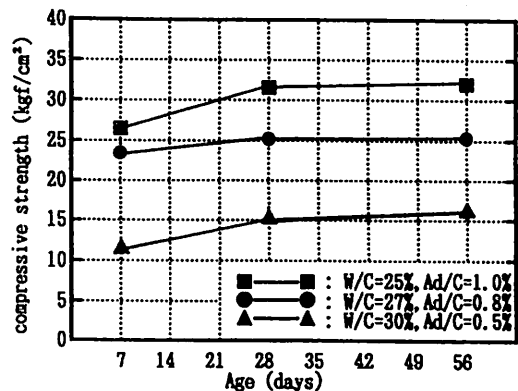


Fig. 8 Relationship between Compressive strength and age of NFC using shirasu pumice

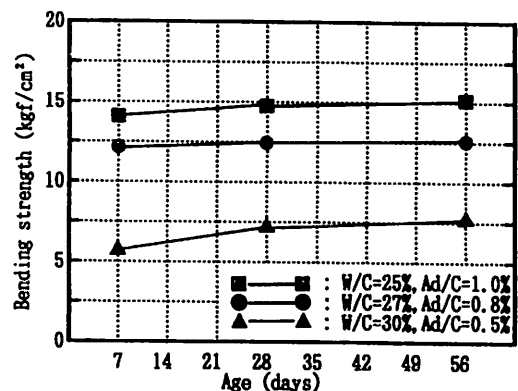


Fig. 9 Relationship between Bending strength and age of NFC using shirasu pumice

一般に、普通コンクリートにおいては曲げ強度は引張強度の1.5～2.0倍、圧縮強度の1/5～1/9程度とされているが、当実験においては、引張強度比は1.2～1.5となり、混合砕石では1.2～1.5とかなり低い値を示した。また圧縮強度比においては、7号砕石の場合1/5.6～1/6.8となり、混合砕石においては、1/6.5～1/8.7を示し、普通コンクリートの範囲となった。

4) シラス軽石のNFC強度

シラス系天然軽石の強度試験の結果を図8(圧縮強度)に、図9に曲げ試験の結果を示す。使用したシラス軽石の粒度は、10～2.5mm径で、比重は1.03、B/V = 40%、JISフロー値240mm、Sp/C = 1.0～0.5% (Sp: ナフタリン系減水剤)とし、W/C = 25～30%と変えた配合で実施した。

供試体の作成、養生法は、いずれも前記、砕石NFCの方法に準じた。その結果、いずれも初期における強度はやや高めとなるものの以降強度の伸びは緩やかとなる。骨材比重に比例した傾向を示す。

NFCの特性である軽量性、保温性、通気性、透水性等を考慮した二次的な製品等の強度の基準を、JISA5416、ALCパネル(鉄筋補強)の圧縮強度規定値30kgf/cm²と想定しても、これら天然軽石の有効利用は充分はかれるものと思われる。

4. 結 語

以上、普通コンクリートと違い、細骨材を用いないNFCコンクリートの諸特性につき検討してきたが、概して下記の項目に要約することができる。

1) NFCが連続空隙を有する条件は、製造時において振動等により、結合材が骨材と分離しないコンシステンシーを有する必要がある。つまり、レオロジ量とコンシステンシーに関係するFunicular第一領域が形成されていることが条件となる。

2) NFCのW/Cを38～52%の範囲とし、高性能減水剤等の適切な使用によって、粘性の制御をし、W/Cの低下をはかる必要がある。

当実験によってW/C = 25%、Ad/C = 1～2%に設定することが出来た。

3) NFCの強度は、B/Vによって大きく変動するため、構造物に付帯する強度を要求する場合、B/V50%、二次的製品の場合、B/V = 30%程度とすることで、強度の確保は充分可能である。

4) シラス軽石の様な軽量で、多孔性材料を用いた

NFCは、表面の凹凸、材料自身の持つ空隙、軽量性等から、二次製品等への応用が十分考えられる。

このように、連続空隙を内包する多孔性コンクリートは、空気径や強度の制限が可能であるばかりでなく、水や空気を通すため、動植物の棲息環境を創出する環境材料として、今後ますます応用性が高まるものと思われる。

今後は標記のごとく、これらNFCを河川や湖沼等の水際構造物に実地に適用して、水質浄化接触材としての効果を実証していく予定である。

末筆ではあるが、本稿をとりまとめるに当り、実験、資料収集等に御協力を戴いた原口立身、横手修技術員の両氏に対し、ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 田中光徳、玉井元治：各種骨材を用いたまぶしコンクリートの垂直入射吸音率、土木学会第46回年次学術講演演習集、第5部、pp.196～197(1991)
- 2) 田中光徳・玉井元治：軽石を用いたまぶしコンクリートの吸音特性、セメントコンクリート論文集No46、pp.892～897、1992.12
- 3) Tamai, M: Properties of No-Fines Concrete Containing Silica Fume, ACI SP-114, pp.799-814, 1989.6
- 4) 田中光徳・樋渡重徳：シラスコンクリートの耐久性に関する基礎的研究、土木学会西部支部研究発表概要集 V-11 p.478～479(1985)
- 5) 玉井元治：透水性コンクリート、コンクリート工学、Vol.32, No.7, pp.134-138, 1994.7
- 6) 玉井元治・河合章・来田秀雄：まぶしコンクリートの海中における性質と水質浄化の可能性、セメントコンクリート論文集、No46, pp.880-885, 1992.12
- 7) 玉井元治・河合章：連続空隙を有するコンクリートに付着する海洋生物の遷移に関する研究、土木学会論文集、No452/II-20, pp.81-90, 1992.8
- 8) 中野祐司・堀口 剛：ポーラスコンクリートの緑化事例について、「コンクリート構造物の緑化」に関するシンポジウム論文集、pp.43-46, 1993.9
- 9) 玉井元治・杉野 守・芦田 馨：連続空隙を有するポーラスコンクリートを用いた緑化に関する研究「コンクリート構造物の緑化」に関するシンポジウム論文集、pp.37-42, 1993.9