

委員会報告 「エココンクリート研究委員会報告」

玉井 元治*¹・水口 裕之*²・出村 克宜*³・岡本 享久*⁴

1. 委員構成

委員長	玉井 元治 (近畿大学)	
副委員長	水口 裕之 (徳島大学)	
幹事	岡本 享久 (日本セメント(株))	
委員	天羽 和夫 (阿南工業高等専門学校)	島田 裕康 (住宅・都市整備公団)
	有富 範伊 (五洋建設(株)) '95.4~	田淵 博 (東亜建設工業(株))
	大久保隆昭 (建設省建築研究所)	出村 克宜 (日本大学)
	親林 和生 (秩父小野田(株))	福手 勤 (運輸省港湾技術研究所)
	金子 文夫 (大成建設(株))	古沢 康彦 (鹿島建設(株))
	河合 研至 (広島大学)	増井 直樹 ((株)大林組)
	桐山 英二 (五洋建設(株)) ~'95.3	丸山 久一 (長岡技術科学大学)
	堺 孝司 (北海道開発局開発土木研究所)	安田 登 (東京電力(株))
	佐藤 文則 (前田建設工業(株))	柳橋 邦生 ((株)竹中工務店)
	島谷 幸宏 (建設省土木研究所)	

2. 委員会活動の概要

1992年6月 リオの地球環境サミットで、世界は地球環境時代にふさわしい努力を約束し、我国では、1993年11月環境基本法を成立させ、基本概念として「健全で恵み豊かな環境の恵沢を現在及び将来の世代が享受できるようにすると共に、人類共有の基盤である有限な地球環境を将来にわたって維持する」とし、人類の持続的発展を目指して、地球を汚染せず動植物との共生を図り、自然浄化能を回復することが大きな課題となってきた。

地球環境とコンクリートとの関係は、セメント、骨材の原材料、セメントの製造と二酸化炭素の排出、産業副産物の利用、コンクリートがらのリサイクル等種々あるが、前述のような現況に鑑み、生物との接点を持つことが可能なコンクリートの研究を進めるため「エココンクリート研究委員会」を設置し、次のような3つの作業部会を設け研究を行ってきた。

- ①定義とフィロソフィー(概念)に関する検討(幹事:水口裕之、堺 孝司)
(地球環境問題、持続可能な開発と材料、エコマテリアル、エココンクリート、等)
- ②エココンクリートの用途と要求条件の検討(幹事:出村克宜、金子文夫)
(概要、生物適応型及び環境負荷低減型エココンクリート、利用形態と要求性能、等)

*1 近畿大学教授、理工学部土木工学科、工博(正会員)

*2 徳島大学教授、工学部建設工学科、工博(正会員)

*3 日本大学助教授、工学部建築工学科、工博(正会員)

*4 日本セメント(株)、中央研究所、工博(正会員)

③ポーラスコンクリートの適用に関する検討（幹事：岡本享久、安田 登）

（ポーラスコンクリートの適用上の要求項目、物性試験方法、文献調査結果、等）

これらの検討事項は、コンクリート材料の物性のみならず陸域や水域に棲息する生物との接点に関する学際的課題等、複雑な問題を含むため、本委員会は各種領域の方々に参加をお願いした。委員会の活動期間は1994年4月から2年間に、本委員会を7回、1～3の各作業部会をそれぞれ8回、7回、8回開催し、委員会報告書を取り纏めた[1]。

3. エココンクリート

3. 1 地球環境問題

1971年ローマクラブが「成長の限界」を報告したのを皮切りに、我々が現在の状態で有限な資源とエネルギーを浪費し地球環境を破壊し続けると「近い将来、人類の生存を危うくする」ことが国際的な課題となってきた。地球環境問題として取り扱われる課題は、先ずアフリカ、インド、中国等の人口増加と食糧問題があり、産業・生活関連のうちエネルギー系では、化石燃料の使用による地球温暖化と酸性雨問題があり、非エネルギー系では、フロンガス等の使用によるオゾン層の破壊、有害廃棄物の越境移動、海洋汚染問題がある。自然生態系では森林破壊、砂漠化と土壌の流出、野性生物の減少が問題となっている。これらはどれも一地域に止まらず地球規模の問題であるため国際的な協力によって解決しなければならない。

生物系は太陽と地球の周辺環境からエネルギーを吸収し、種々の方法によって循環する食物連鎖を形成し46億年かけて現在の青い地球を構成してきた。図1は自然が形成する生態系の活動として食物連鎖を示す。この循環系の一部が破壊されようとしている。

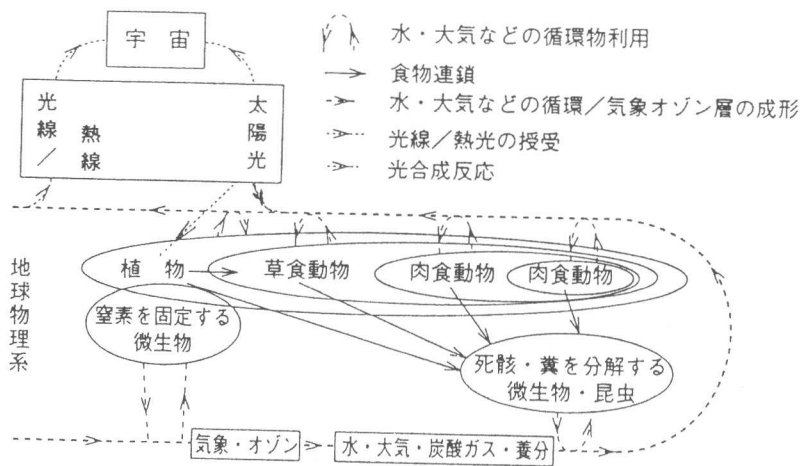


図1 生物系の活動（食物連鎖）[2]

3. 2 持続可能な開発と材料

材料の生産や利用は、資源やエネルギーの消費、不要な物質や熱の排出等、何らかの形で環境に負荷を与えている。環境負荷項目としては、大気汚染、水質汚染、エネルギー消費、廃棄物等を挙げることができる。中でも、二酸化炭素排出量は地球の温暖化に関係した重要な要因であり、電力、運輸、セメント、鉄鋼、等の産業が関与している。これら産業の1992年の生産量が継続した場合、商業ベースで開発可能な化石燃料は、石炭が209年、石油が45年、天然ガスが52年とJ E A（国際エネルギー機関）が報じており、化石燃料は大気汚染と共に枯渇化も

深刻な問題である[3]。環境負荷を与えない持続可能な開発のためには廃棄物量を少なくし、しかもリサイクルの推進が不可欠である。1991年に「再生資源の利用の促進に関する法律」いわゆるリサイクル法が制定され、各種製品ともリサイクル率を推進しているが、プラスチックのように種類の多い製品は12%と低いのが現状である。それに対しビール瓶(95%)、タイヤ(86%)やアルミ缶(53.8%)はリサイクル率の高い製品であり[4]、近い将来、各製品とも完全リサイクル化を目指して検討する必要がある。

3.3 エコマテリアル

地球環境に優しい材料とは、資源・エネルギーの使用量が少なく、かつ使用後に発生する問題が少ないものといえる。「エコマテリアル」の概念は、未踏科学技術協会レアメタル研究会によって初めて提案されたものであり[5]、それに相当する英語は造語で「Environment Concious Materials」と表記されている。この概念では、21世紀の材料とは

- (1) 人類の活動圏を広げ、活動環境を拡張する(フロンティア性)
- (2) 人類の活動圏と外部環境との調和をはかる(環境調和性)
- (3) 活動圏の中で生活環境に豊かさを与える(アメニティ性)

を満足する材料である。これらは相互に対立する内容を含んでいるが、従来の材料開発はフロンティア性あるいはアメニティ性に重きを置いたものであったと言える。しかし、最近では、エネルギー多消費型の高性能を材料に求めず、環境負荷の低減を第一義として研究・生産活動を行おうとする考え方が現れてきている。また、製品の生産、消費、廃棄まで各段階での環境負荷を定量的、総合的に評価するライフサイクルアセスメント(LCA)が注目されている[6]。

更には、大量の資源を使い捨てにする浪費型の産業社会を循環型にするための具体的な動きとして、国連大学の「ゼロミッション計画」が動き出した。この計画は、最終的には廃棄物ゼロの社会システムを構築しようとする壮大な計画である。この考え方を実現するために、従来とは逆の生産技術体系、すなわち、一般的な資源から新しいものを作り出すという考えではなく、廃棄物を資源として利用するための生産技術「インバース・マニファクチャリング」に関するプロジェクトが行われようとしている。セメント産業においても、焼却灰、下水汚泥などの廃棄物を主原料とするセメント製造の試みがなされている。

エコマテリアルとしての要件は次の3項目である。

- (1) 原材料採取による環境負荷の少ないもの
- (2) 素材および製品製造の処理・加工にエネルギー消費の少ないもの、およびCO₂を含む有害物質の排出の少ないもの
- (3) 快適であることおよび使用後の処理に環境負荷の少ないもの

3.4 エコマテリアルとしてのコンクリート

わが国の石灰石埋蔵量約580億トンであり、年間石灰石採掘量は骨材用も含めて2億トンとされている[7]。セメントの製造では、燃料に加えて石灰石に固定されている二酸化炭素が排出され、普通ポルトランドセメント1t当たりCO₂総排出量は827kgとなり[8]、セメント産業のCO₂の排出量は高い水準にあると言える。CO₂は地球温暖化の原因とされているが、この意味においてはコンクリートは素材の製造段階においてはエコマテリアルとは言い難い。しかしながら、CO₂の排出量低減の一つの方策として、産業廃棄物である高炉スラグやフライ

アッシュなど、ポゾラン反応のある混和材をセメントの一部に代替品として使うことが考えられる。その置換率に応じてCO₂の排出量は単純に低下する。このような配慮をすることにより、コンクリートは少なくともエコマテリアルに一步近づくことになる。また、CO₂発生を抑制するためのセメント製造法の改良も重要となる。コンクリートに用いられるセメントは石灰石と粘土を主原料として製造されるが、コンクリートの炭酸化により再びその多くが石灰石と同じ成分となる。したがって、この意味においては、コンクリートは、超長期的に見れば、自然のサイクルを完結させるエコマテリアルと言えるかもしれない。

3. 5 エココンクリート

エココンクリートとは、地球環境負荷の低減に寄与すると共に、人間を含むあらゆる生物とのインターフェイスにエコロジカルな配慮がなされたコンクリートと定義することができる。すなわち、エココンクリートは以下に示す2つに大別される。

- (1) 廃棄物、汚染、汚濁、温暖化、資源枯渇などの環境への負荷を低減させる環境負荷低減型エココンクリート
- (2) 生態系との調和あるいは共存を図る生物対応型エココンクリート これらの概念を模式的に示すと図2のようになる。

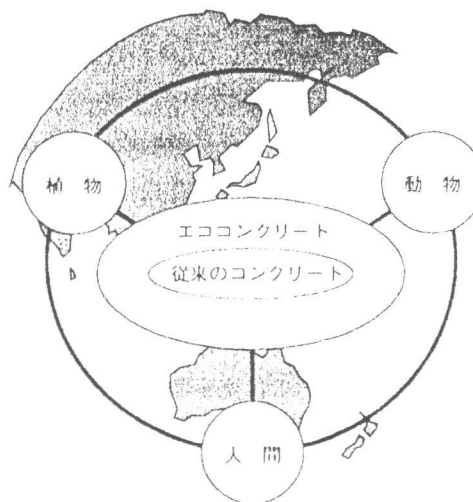


図2 エココンクリートの概念

3. 5. 1 環境負荷低減型エココンクリート

地球環境への負荷を低減できるコンクリートを言い、再資源化を含めライフサイクルを通じて、資源の使用量および資源の採取・精製・加工並びに使用時などに必要なエネルギー量や地球環境に与える負荷が少ないコンクリートが考えられる。具体的には、長寿命コンクリート（超耐久性コンクリート）、再生骨材を用いたリサイクルコンクリート、熱や音や水収支を考慮したポーラスコンクリート、種々の廃棄物を原料として製造したセメント（エコセメント）を用いたコンクリート、混合セメントの利用やポゾラン質混和材を用いたコンクリート等がそれに該当する。

3. 5. 2 生物対応型エココンクリート

生態系との調和あるいは共生を図ることができるコンクリートであり、生物の棲息場を確保したり、生物へ悪影響を与えないように工夫したコンクリートが考えられる。これらは構造物の形態、配置場所等の構造レベルの工夫や、コンクリートの構成物質に関わる材料レベルでの工夫がなされている。具体的には、生物の棲息場の確保として水生生物に多量の付着面や棲息空間を与えたり、草本植物の根系が侵入し成長と固定化する連続空隙を有するコンクリートがこれらに該当する。また、コンクリート構造物の設置やコンクリートを使用することが直接生物に及ぼす場合が多いが、これらの影響を低減させる工夫をしたものもエココンクリートとして取り扱うことができる。生物の棲息に悪影響を与えないものとして、アルカリ分の溶出を低減したり、コンクリート内部に水分や気体輸送を円滑にし生物の棲息を補助した構造形態としたものもこれらに相当する。

4. 用途と要求条件

4. 1 概要

前述の内容についてエココンクリートの分類とそれらの用途を示すと図3のようになる。

ここでは、特に、その用途開発が盛んに行われている生物対応型エココンクリートの用途と要求条件を中心に概説すると共に、ポーラスコンクリートを用いた場合の環境の熱収支及び水収支に及ぼす効果などについても述べている。なお、生物対応型エココンクリートについては、特に、コンクリートの組織及びコンクリート構造が創造する空間の大きさを尺度として生物との接点をとらえている。一方、現状の研究・開発状況に鑑み環境負荷低減型エココンクリートのうち、コンクリート製造時の環境負荷を低減するもの及びコンクリートの使用時に環境負荷低減を考慮したものについてはふれていない。しかし、このような目的で製造されるコンクリートを含めることによって、エココンクリートの全体像が明らかになると考えられる。

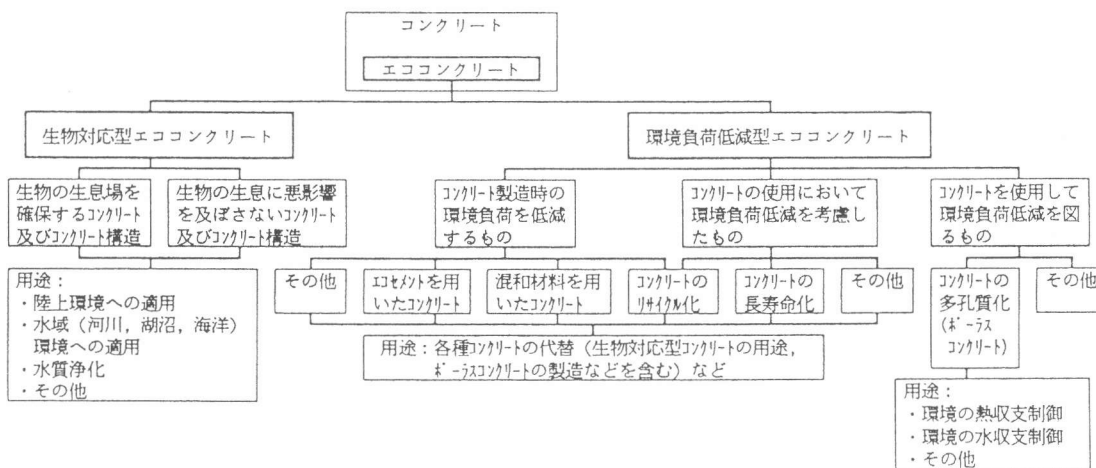


図3 エココンクリートの分類と用途

4. 2 生物対応型エココンクリート

4. 2. 1 陸上環境への適用

陸生生物がコンクリートの表面や内部に棲息するには、コンクリートを多孔質化する必要があり、しかも微生物、小動物、植物等の棲息または植生する生物に悪影響を与えないものでなければならない。連続空隙を有するポーラスコンクリートを写真1に示す。

1) 植物が生えるためのコンクリート：土壌が持つ機能を人工的に造る必要があり、根系が伸長するための空間、アルカリ成分や塩類の溶出防止及び保肥性、保水性、透水性の付与が要求される(写真2参照)。

2) 微生物や小動物の棲息のためのコンクリート：細菌や糸状菌等の土壌微生物、線虫昆虫、蜘蛛、ミミズ、トビムシ等の土壌小動物の棲息のためには、適当な空隙、保水性、透水性及び腐食土等の餌となる有機物が必要である。

4. 2. 2 水域環境への適用

1) 河川・湖沼環境とエココンクリート

河川・湖沼は水そして岸、底、構造物等から構成されている。これらの空間と水が一体となって生物が棲息する住み家(ハビタット)を形成する。これは各生物の生活段階で利用する場

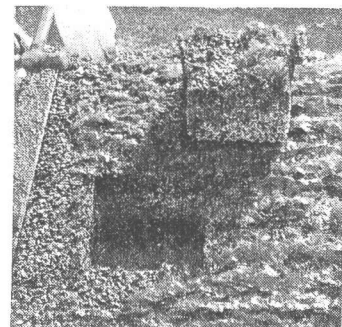
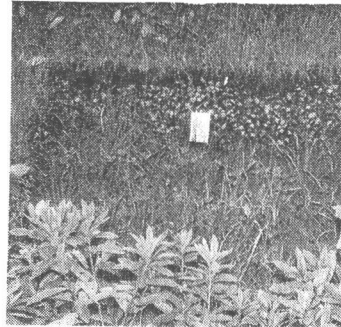


写真1 ポーラスコンクリート, 写真2 植栽への適応, 写真3 生物付着の状態

所であり、また生活史の中で必要となるハビタット間の連続性を保つことが必要である。

ポーラスコンクリートは、連続空隙を形成しており、通気性、透水性、水分の保持、表面の肌理等に特徴がある。水中や水際域に設置すると藻類の付着や原生動物等、小動物の住み家が形成され昆虫類や魚類に対しても良い環境が創造されるものと考えられる（写真3参照）。

2) 海洋環境とエココンクリート

海洋におけるエココンクリートの用途について考察する場合、コンクリートの生態的特性をポーラスコンクリートなど「エココンクリート材」としての材料面から検討する方法と、コンクリート材およびコンクリート構造が創出する生態的空間としての「エココンクリート空間」として検討する方法等がある。コンクリートは、その材料特性上、微細空間やポーラスコンクリートのような空隙空間、及びコンクリート構造物の創出するマクロな空間まで幅広い空間的スケールを持っている（図4参照）。一方、生態系のスケールもマイクロからマクロなものまで多重の階層構造を成しており、更に距離スケールから時間スケールまで極めて幅が広い。

ポーラスコンクリートの連続空隙径は、使用する骨材と結合材量によっても相違するが、一般の値は、0.01~10mm であり、その空間に棲息する生物は、バクテリア、原生動物、小型動物等が考えられる。しかし、表面性状が凹凸であり、通気性や透水性があることから付着生物が多様化するものと思われる。

空隙の大きさ	μ	mm	cm	m	km	機能
材料 (人工) (自然)	コンクリート	砂浜	繊維、ポーラスコンクリート 礫	消波ブロック 礫	岩礁	
生物	.....バクテリア.....	.....原生動物.....	.....環形動物 (多毛類).....	.....軟体動物..... .....節足動物.....	.....魚類..... .....鳥類.....	生物の棲みか (空隙)
利用形態 (生物共生)	.....ハビタット..... .....ビオトープ.....	.....ハビタット..... .....ピオトープ.....	.....ハビタット..... .....ピオトープ.....	.....ハビタット..... .....ピオトープ.....	.....ミテゲーション.....	
ろ過 (透明度)	.....					透水性
光 (透過、反射)	.....光合成細菌.....	.....植物プランクトン.....	.....海藻(軍)類.....			N, Pの除去 付着基盤の粗度 (礫掛け、藻場造成)
集積	.....餌のトラップ (栄養塩類).....					
流速	.....滞留時間、渦の形成 (生物の集積)、剥離.....					透水性、 表面粗度 形状 (配置)

図4 空隙性状と棲息生物及び水質浄化に関与する項目

3) 水質浄化

ポーラスコンクリートの水質浄化機能は、コンクリート表面に形成された生物膜の作用による。生物膜にはバクテリアから単細胞藻類、小動物、大型藻類、貝類、そして大型動物まで種々の生物が環境条件に応じて棲息しており、生物膜上では一種の生態系が形成されていると考えられている。生物膜による水質浄化を行うものに直径20-30cmの自然石やコンクリート塊を用いた礫間接触酸化法がある。ポーラスコンクリートは内部空隙を有するので微生物が棲息しやすく生物膜の形成状態も複雑で、生態系も空隙性状に依存して多様であると考えられる。ポーラスコンクリートを用いて沿岸域や河川の護岸等を構築すると、自然の水質浄化能力はこれまで以上に向上するものと予測される。

微生物による水質浄化の原理は汚染物質の生物的固定と代謝分解である。ポーラスコンクリートの浄化能力は棲みつく微生物の量と種類、微生物の代謝機能を働かせる培養条件としての周辺環境条件に依存する。ポーラスコンクリートの特徴である空隙性状と棲息生物及び水質浄化に関与する項目との関係を図4に示す。

4. 3 環境負荷低減型エココンクリート

4. 3. 1 熱収支—緑化コンクリート—透水性舗装

普通コンクリートの熱伝導率は1.2-1.3(kcal/m·h·℃)で夏期には暑く、都市内部ではヒートアイランド現象がおこり、冬期には逆に底冷え現象をおこす一つの原因となる。ポーラスコンクリートは多孔質体であるため一般に熱伝導率は0.8(kcal/m·h·℃)以下であり、夏は温度上昇の抑制、冬は保温効果が期待できる。ポーラスコンクリートを基盤として緑化コンクリートとすると構成される空気層や植物が含む水分の断熱効果により、また建物のコンクリート面の緑化は微気象調節機能につながる。

4. 3. 2 水収支—地下浸透工法—その他

ポーラスコンクリートを水収支の制御を目的として歩・車道に透水性舗装として、また浸透柵、浸透トレンチ、浸透側溝等に使用すると、合流式下水の負荷を減少させたり、都市内部の地盤沈下を少なくさせ、更に水収支を自然環境における水収支に近づける。また、透水性舗装や壁面に使用すると乱反射による眩惑の解消および騒音の低減を図ることができる。

4. 4 利用形態と要求性能

4. 4. 1 利用形態

エココンクリートは普通コンクリートと同様に、所要の強度・耐久性を備え、エコマテリアルとしての特殊な機能を有する必要がある。例えば強度や耐久性状に関しても、普通コンクリートとの複合化や繊維質材を混入して改良する方法もあるが、植物の植生や水質浄化及び環境保全等のそれぞれの利用形態によって、物理的な性質のうち空隙径、全空隙率、連続空隙率、透水性等、および化学的な性質として遊離石灰の溶出の有無が、内部要因の相違によって変化するため所望の要求に合うものを提供することが望ましい。

4. 4. 2 要求性能を満足するための物性管理

ポーラスコンクリートの空隙率は20-30%を目安として、結合材の特性、独立空隙、連続空隙の大きさや形状とその量等、要求される因子は多い。それらの要求性能に対する材料計画のフローの一例を表1に示す。

表1 要求性能に対する材料計画のフローの一例

用途・目的の設定	緑化、水質浄化、動植物の棲息場を創造し自然環境の回復・復元、再生、景観、漁礁等
使用場所の設定	緑化・自然環境の回復・復元・再生：山、河川、宅地の法面や平面 水質浄化・自然環境の回復：ビルの周辺や屋上緑化等 河川、湖沼、海浜等
使用方法の設定	植物：芝、雑草、花卉類か灌木か、また1年草か、多年草か、または藻類か？ 動物：微生物、原生動物、甲殻類、多毛類、貝類、昆虫類か？
使用形態の設定	ポーラスコンクリートだけで製造可能か、RCにするか、板かブロック化するか、その形状は、普通コンクリートと複合化するか、繊維質素材やポリマー等の有機質材料を利用するか？
耐用年数の設定	例えば、 2～3年：灌木によって法面保護する基盤 10～20年：短期自然環境の回復・復元する場合等 20～30年：漁礁用コンクリートは30年以上としている 30～50年：海洋に利用する鋼材は50年以上としている
材料計画	用途・目的に応じて物性の目標値を設定し、これを満足するための使用材料の選定、調合等を決定する。例えば、強度、空隙率と空隙径、透水係数、耐水性、遊離石灰の溶出等 強度：使用する骨材の粒径にも関係するが、主として結合材の強度と、その単位数に依存する。 空隙率と空隙径：使用する骨材の種類（粒径と空隙率等）と結合材の量による。 耐久性：水中における凍結融解の抵抗性は弱い 強度、耐久性、空隙量などポーラスコンクリートの基本的な性能以外にエコマテリアルとして必要な物性値を設定し、これを得るため使用材料・調合の選定を行う。例えば、 透水係数：使用する骨材の種類（粒径と空隙率等）と結合材の量による。また水頭や水の温度にも影響される。 遊離石灰の溶出：水際や水中では初期において遊離石灰の溶出が大きく、生物への影響と結合材の耐久性も低下させるため注意する必要がある
物性値の管理	○内部組織・空隙等の管理物性値 細孔径分布（独立空隙量、連続空隙量）、吸水率、含水率、透水係数、透気係数、透湿係数、比熱、熱電導率、遮音率、 ○表面性状の管理物性値 熱伝達率、吸音率、表面硬度、摩耗抵抗性 ○強度性上の管理物性値 圧縮強度、曲げ強度、引張強度、せん断強度、弾性係数 ○耐久性上の管理物性値 中性化、耐久性指数、乾燥収縮率、電気伝導率、pH
施工・維持管理	

5 ポーラスコンクリートの適用

5.1 概要

生物の棲息環境に適するポーラスコンクリートの設計上の位置づけは、岩盤、構造用コンクリート、砂礫地盤等の複合的な領域に属し、強度と透水性の二次元で表現すると各材料の概念は図5のように示すことができる。それら材料を使用するに当たっては用途や要求される機能に応じた性能を特定する設計項目を定める必要がある。ここでは基本的な利用形態と設計上の要求項目を検討し、生物・環境の接点に使用するため化学的性質の観点から環境調和性の評価を試み、ポーラスコンクリートの物性試験（案）を提案すると共に、共通試験を行い性能を規定するための評価項目を明らかにした。更に植生、生物付着、水質浄化を始めとする生物とコンクリート及び環境とコンクリートに関する文献調査を行い、研究目的別、試験項目別に取り纏め、この種の研究と技術の現状を把握するための資料を提供した。

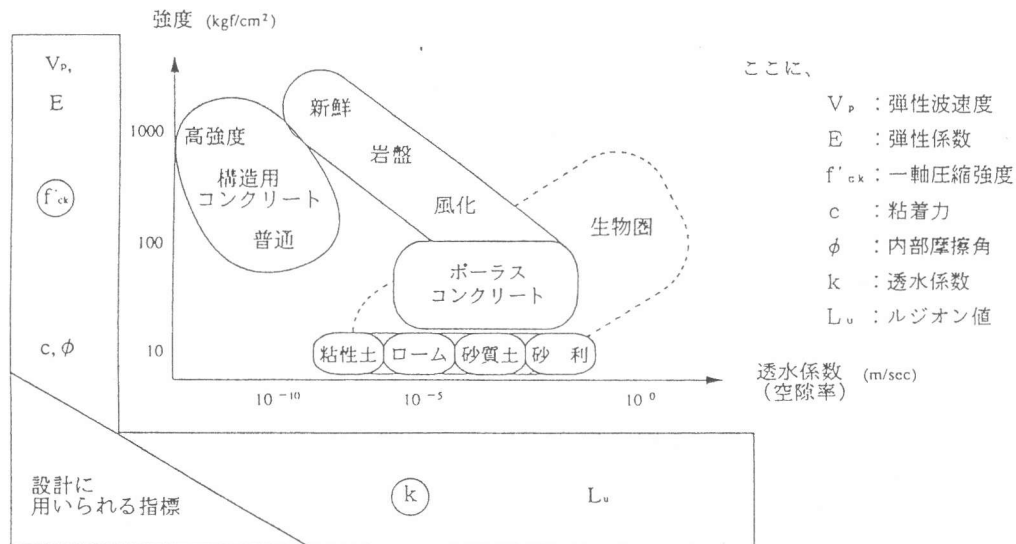


図5 ポーラスコンクリートの物性に関する概念

5.2 適用上の要求項目

5.2.1 設計観点からの要求項目

ポーラスコンクリートの使用目的は環境負荷低減及び生態系との調和・保護に関するものが多い。また、それらは用途のみならず製造から供用後の管理に至るまで極力環境負荷を低減することをも特徴としている。

1) 性能を把握するための試験項目

i) 共通試験項目：圧縮強度試験と曲げ強度試験

部材の製造、運搬、据付け過程で損傷を防止するには、適切な強度を必要とする。

ii) 特定試験項目：各用途・目的にたいする性能を評価するために行うもので、水の制御や水質浄化コンクリートには、透水係数、全空隙率、連続空隙率の試験を、植栽コンクリートでは、空隙径、連続空隙率、pH等の化学物性の試験を、吸音や防音コンクリートでは、空隙径、連続空隙率、内部空隙の表面粗さの試験を、断熱・防熱コンクリートでは、熱伝導率、熱拡散率等の熱的性質の試験を行う必要がある。

5.2.2 化学的物質からの要求項目

コンクリートを構成する材料は化学混和剤を除外すると殆どが無機物であり、硬化体から溶出する水質汚濁防止法に定められた無機有害物質は、ppbオーダー以下かまたは検出されないとしている[1]。化学混和剤についても土木学会基準によって有害物質質量およびマウス・ラットに対するLD50の上限が規定されており、安全であると考えられる。ただ、ポーラスコンクリートからの遊離石灰の溶出は水域において材令初期に大きく、強度低下にも繋がるので注意が必要である。材令初期に水中や水際域に設置する場合、周辺の生物に悪影響を与えることがあるため、表面を中性化してから使用する等の対策が望ましい。

5.3 ポーラスコンクリートの物性試験方法(案)

5.3.1 供試体の作成と基本物性

1) 供試体作成：供試体の寸法を規定、締め固め方法等は使用目的に合わせて行う。