

透水性コンクリートの実用化に関する研究

Study on Development of Practical Use of Permeable Concrete

研究第三部 主任研究員 片 田 雅 文
リバーフロント研究所長 小 池 達 男

Nature-rich river works has recently become popular, and in addition to conventional structural safety and economy, river structure functions suitable for diversified biological environments are in demand. These requirements can be satisfied by using permeable concrete to form conventional river structures.

Here, following our study of the mixtures and qualities of permeable concretes, we propose the use of "Ecolo-crete", one of the various permeable concretes available. We also studied a method for achieving practical use of "Ecolo-crete" as a foundation for "greening".

Key words: Nature-rich river works, permeable concrete, "greening" of dike, "Ecolo-crete" ("ecological concrete"), cast-in concrete

1. はじめに

現在、河川整備においては、治水安全度の確保に加えて、多自然型川づくりによる自然豊かな、良好な景観を持つなどの環境に配慮した川づくりが積極的に推進されている。このような川づくりが進むなか、これまでの河川構造物の主要な材料であり、自然環境への配慮といった面からは好ましくないといわれるコンクリートも、その特徴である構造材としての強度や経済性の観点から、これから河川改修においても、重要な材料として使用されることを否めない。

現在、コンクリートを用いた護岸に植生機能等を付加させることが、様々な方面で検討されている。

本報告は、透水性コンクリートを用いて護岸を緑化することを目的として、配合、品質、施工により一定の空隙率を有し、かつ所定の強度を備えた“エコロクリート”を提案し、さらに、これを活用した緑化手法等の検討をおこなったものである。

2. 緑化基盤としてのコンクリート護岸の概要

2-1 コンクリート護岸の課題

コンクリート護岸は、構造体として安定しており、かつ、法面勾配のきつい護岸にも対応ができる、用地等の制約がある箇所や土砂流出の著しい箇所等に多用されている。

しかしながら、通常のコンクリートは、難透水性を呈していることより、植物に必要な水分の供給が困難である。また、密実であることより、コンクリートに植物が活着せず、通常のコンクリート護岸では、覆土をするなど補助的な対策を実施しない限り、植生の基盤として適さない。

ここに、コンクリート護岸を植生基盤として用いる場合の課題を以下に示す。

- ① 水分の供給があること
- ② 植生が流水等により流失しないこと
- ③ 護岸としての強度が確保されること
- ④ 養分が補給できること
- ⑤ 基盤のpHが植生に影響しないこと

2-2 緑化基盤としての透水性コンクリートの概要

透水性コンクリートとは、連続または独立した空隙構造、あるいはこれら2種類の空隙構造を

多く含む多孔質コンクリートの総称である。

透水性コンクリートでは、この空隙内に土砂や種子等が入り込み、植物の根が侵入することが可能となり、植生の自然繁茂が期待できる。また、低水護岸など流水の影響を受け易い場所などで、速やかに植生を活着させる必要がある場合には、保肥性等に優れた資材を空隙内に充填させることにより、植生の基盤とすることも可能となる。

また、このコンクリートの特徴ともいえる大きな空隙率は、単位セメント量、水セメント比、骨材の寸法等により変化し、図-1に示すように、空隙率が増加するとコンクリートの圧縮強度が急激に低下する。

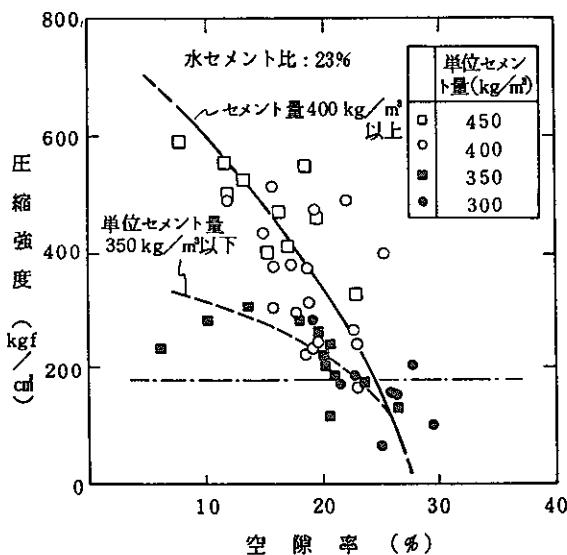


図-1 空隙率と圧縮強度の関係

Fig. 1 Relationship between Percentage of Voids and Compressive Strength

なお、建設省では平成9年2月に

- ① 重量は350kgf/m³以上を標準とする
 - ② 圧縮強度は100kgf/cm³以上を標準とする
 - ③ 空隙率は、連続空隙率で25%以上を標準とする
- という透水性コンクリートを河川護岸として用いる場合の試験施工特記仕様書(案)を提示している。

3. エコロクリートの検討について

透水性コンクリートは、前述したように、骨材の種類や配合により空隙率や強度が変化する。したがって、これを緑化護岸の基盤として使用するためには、使用箇所に応じた強度を有し、植生に必要な空隙率を確保することが肝要である。

そこで、これらの条件を満足するための検討をおこなうことにより、緑化護岸の基盤となる“エコロクリート”的提案を試みた。

3-1 エコロクリートの目標

透水性コンクリートを用いた緑化基盤材は、多方面で開発されており、仕様もそれぞれ異なる。また、その多くは、ブロックとして開発しており、適用範囲にも限りがある。

そこで、エコロクリートでは、様々な現場条件に対応でき、普通コンクリートと同程度の強度をもち、どこでも使用できるよう、現場打込みが可能であり特殊な材料を使用しないことを目的として検討した。なお、エコロクリートの開発目標を以下に示す。

I 透水性

透水性が高く、コンクリート中を水が通水する

II 強度

護岸や擁壁等の構造物本体に利用できるよう、圧縮強度が材齢28日で200～250kgf/cm³程度である

III 練り混ぜ、運搬

通常のコンクリートと同様に、レディーミクストコンクリート工場で練り混ぜができ、トラックアジテータ車で運搬できる

IV 打込み、締固め

バケット、ホッパ等を用い、現場で大量に打込みができ、振動機で締固めができる

V 緑化空間

植生材を配置したり、緑化材を吹き付けることで、コンクリート面に植物を生やすことができる。さらに、コンクリートの背面から、水が供給され、植物の根がコンクリートの空隙部に入り込んで保持され、生育が促進されることで、植生が継続する。

3-2 空隙径および空隙率の確保

エコロクリートを植生にとって良好な土壤（基盤）とするためには、コンクリート内部に植物の根が侵入することが重要な要素となる。このためには、できるだけ大きな空隙径や空隙率を確保するのが望ましいが、空隙率が大きくなると強度が低下するため、空隙径や空隙率の大きさには限界がある。これらは主に骨材に支配されており、5号（寸法 13～20 mm）、6号（寸法 5～13 mm）及び7号（寸法 2.5～5 mm）の碎石を用いて透水性コンクリートへの雑草根の侵入状況を調べた実験では、7号碎石での植生は不可能であるが、6号碎石で1～2 mm程度の、また5号碎石では3～4 mm程度の太さの植物の根が侵入可能である結果が得られている。なお、この実験における空隙率は約30%で、各碎石の平均空隙径は5号で5.8 mm、6号で2.7 mm、7号で1.2 mm程度であった。

のことより、根の侵入といった観点から必要となる空隙径、空隙率を確保するために使用する骨材は、最低でも6号碎石とし、できれば5号碎石を用いた配合を検討することが望ましいことがわかる。

3-3 配合および品質・施工に関する検討

コンクリートの配合における指標として、モルタル分（ペースト分）と粗骨材の割合を示したモルタル（ペースト）粗骨材比（M/G、P/G）がある。図-2に示すように、P/G の比率が増えれば圧縮強度は増加するが空隙率は減少するという報告がある。

のことからも、透水性コンクリートでは、大きな強度で大きな空隙を確保することが困難なことがわかる。したがって、他の透水性コンクリ

ートでは、空隙率をできるだけ大きく（30%程度）設定し、圧縮強度を 100kgf/cm² 程度とした、粗骨材をセメントペーストで固めたり、特殊な混和剤を用いたものが多い。

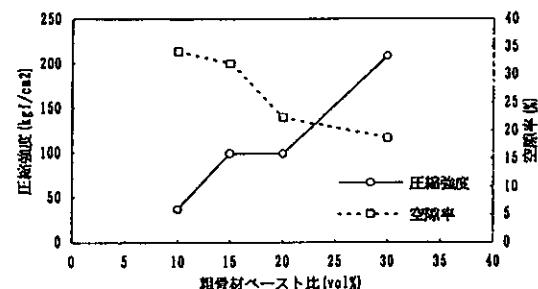


図-2 普通セメントの P/G と圧縮強度、空隙率の関係

Fig. 2 Relationship between P/G of Ordinary Portland Cement, Compressive Strength and Percentage of Voids

しかし、エコロクリートでは、圧縮強度を 200kgf/cm² 程度とし、レディーミックスコンクリート工場での生産が可能になることを目標としている。このためには、特殊な材料を用いず、配合を工夫することでこれらの条件を満足する必要がある。

そこで、圧縮強度を得るために細骨材を用い、空隙径および空隙率を確保するために粗骨材として5号碎石を使用することなどにより、下記の標準的な示方配合を提案した。

表-1 エコロクリートの示方配合（例）

Table 1 Specified Mixture of "Ecolo-crete"

W/C %	S/a %	空隙量 %	単位量 (kg/m ³)				
			W	C	S	G	混和剤
30	20	21±3	95	315	315	1261	0.945

注) 1. C: 普通ポルトランドセメント、S: 混合砂（山砂、碎砂）

G: 5号碎石、混和剤: ポソリスNO.70

2. 空隙量は、型枠バイブレータで 15 秒/箇所、締固めた時の値を示す

なお、このときのエコロクリートの材齢4週間目における力学特性を以下に示す。

- 圧縮強度……200kgf/cm²程度
- 引張強度……16kgf/cm²程度
- 曲げ強度……45kgf/cm²程度
- 最大付着応力度……59kgf/cm²程度
- 単位容積質量……1.95～2.0 t/m³程度
(型枠バイブレータで15秒/箇所、締固め)
- 透水係数……3～4×10⁻²cm/秒程度

注) *縦リブ、横フジの異形棒鋼を使用。エコロクリートは透水性があるので、錆防止のため、エポキシ樹脂塗装鉄筋等を用いる。

また、寒冷地でエコロクリートを用いた場合に、凍結融解作用による劣化が懸念されるため、耐凍害性を実験検討した。実験は、「急速水中凍結溶解試験」に準拠した一面凍結溶解試験方法とし、供試体は、混和材を使用しないセメント単味の配合のものと、シリカヒュームを10%混和したもので実施した。

結果を耐久指数で評価したところ、前者で51.6、後者で73.8という結果が得られた。耐凍害性の目安としては、耐久指数が60以上とされているが、エコロクリートの配合でも、シリカヒュームなどの混和材を使用することにより、優れた耐凍害性を期待できることがわかった。



写真-1 透水状況

Photo 1 Water Permeation Condition

さらに、これらの品質を確保するためには、現場での施工に関する検討が必要となる。締固め方法について、突き棒、高周波バイブルーター、型枠振動機の3種類による室内試験を実施したところ、型枠振動機による締固めが効果的であることがわかった。また、打込み高さや、締固め高さに関する実験でも、高さ50cm～1mで打込み、締固め高さが20～50cmの間であれば、型枠振動機で15秒間程度締固めることで、エコロクリートの目標値を満足できることがわかった。

これは、ホッパーやバケットでエコロクリートを打込み、型枠振動機で締固めることにより、現場での打設が可能なことを示している。なお、実際に、現場でこの方法により施工し、所定の条件を満たした報告もなされている。

ここに、現場施工上の注意点を示す。

- 運搬時間
(水分が通常のコンクリートに比べ少なく、水分蒸発による品質変化を防ぐため)
- オーバーバイプレーション
(材料分離による品質変化を防ぐ)

- 打設高、締固め高さ
(均質な品質を確保する)

3-4 エコロクリートの特徴

エコロクリートは、開発目標にも掲げたよう

- 透水性がある。3～4×10⁻²cm/秒
- 強度がある 200kgf/cm²程度
- 現場打ちが可能である
- 植栽基盤として使用できる

といった特徴がある。

そこで、表-2により、他で開発した透水性コンクリートとエコロクリートとの特性を比較した。

表-2 他の透水性コンクリートとエコロクリートの諸元比較

Table 2 Comparison of Specifications of "Ecolo-crete" with Those of Other permeable Concretes

	A	B	C	D	エコロクリート
圧縮強度 kgf/cm ²	100~150	180	20~100	180~200	200~250
空隙率 %	30	30	20~35	18~30	21
単位質量 kg/m ³	1.9~1.95	1.85	2.0	1.8~1.9	1.95~2.0
水セメント比 %	25	20	50	21~23	30
細骨材率 %	—	—	—	12~15	20
粗骨材径 mm	13~20 20~30	10~15	20~30	13~15	15~20
混和剤	高性能減水剤	減水剤	減水剤	減水剤 特殊混和剤	減水剤
使用形状	現場打ち ブロック	ブロック	ブロック	ブロック	現場打ち ブロック

4. エコロクリートを活用した緑化手法について

4-1 緑化に関する検討

植物の生育には、光、水、土壤などの要因が複雑に絡み合って作用する。とくに、透水性コンクリートを活用した河川の緑化護岸の場合、水分の確保と良好な土壤の確保という点で工夫が必要である。

そこで、透水性コンクリートを植生基盤とする場合の留意点を示すと、

- ① 根の成長や発芽、水分供給に必要な空隙の確保
 - ② 植物の生育に必要な水分、肥料成分の確保
 - ③ 植物の生育に影響しないpHの維持
- といったことがあげられる。

①については、3. でも述べたように、エコロクリートはその条件を満たしている。

②については、空隙が大きいということは、コンクリート内部に水分が浸透する反面、保水性に乏しいことが想定される。水際部においては、常に水分の供給があるが、それ以外の部分では

また、コンクリートから溶出するアルカリ成分は、植物の成長に悪影響を及ぼすおそれがあるが、高炉セメントやシリカフュームを用いることにより、影響を小さくすることが可能である。なお、緑化コンクリートブロックの開発に関する研究では、短期的なpHの上昇は植物の生育には大

きな影響がないとする現地実験結果が報告されている。

保水性を改善する方法として、コンクリート内部に保水剤を充填する方法や、コンクリート表面に人工土壤等の層を設けることで保水性を高めることが考えられる。そこで、室内試験によって、これらの効果を検討した。

試験ケースは表-3に示す8ケースで、それぞれについて植物の発芽本数、草丈、根のコンクリートへの侵入深さと長さに関する計測をおこなった。

図-3に、発芽本数と草丈について、また、根のコンクリートへの侵入状況を図-4に示す。さらに、実験終了後、実験体を室外に移し、約2ヶ月間経過した後の植生状況を写真-2に示す。

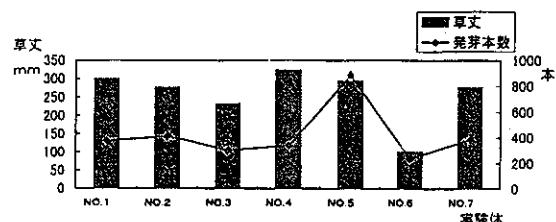


図-3 発芽本数と草丈の関係
(播種後約2ヶ月)

Table 3 List of Vegetation Used in Laboratory Test

表-3 室内試験における植生実験一覧表

Fig. 3 Relationship between Numbers of Germinated Seedlings and Seedling Heights
(approximately 2 months after sowing)

No	コンクリートの種類	設計空隙率	緑化方法	層 厚	シール材有無	備 考
No 1	透水性コンクリート	21±3 %	繊維吹付け ¹⁾	80 mm	ベントナイト ²⁾	川砂利使用
No 2	透水性コンクリート	21±3 %	繊維吹付け ¹⁾	40 mm	ベントナイト ²⁾	川砂利使用
No 3	透水性コンクリート	21±3 %	繊維吹付け ¹⁾	20 mm	ベントナイト ²⁾	川砂利使用
No 4	透水性コンクリート	21±3 %	繊維吹付け ¹⁾	40 mm	無	川砂利使用
No 5	透水性コンクリート	30±3 %	客土吹付け ³⁾	40 mm	無	5号碎石使用
No 6	透水性コンクリート	30±3 %	圧 入 ⁴⁾	0 mm	無	5号碎石使用
No 7	普通コンクリート	5±1 %	繊維吹付け ¹⁾	40 mm	無	
No 8	透水性コンクリート	30±3 %	種子混入 ⁵⁾	無	無	5号碎石使用

注 1) : アクリル合成繊維を混合させた土壤に粘結材を投入し、種子等を混合したものを所定の厚みに塗り付けた

2) : 土壤のコンクリートからの乾燥を防ぐために、コンクリート表面に不織布を敷き、ベントナイトを1~2cm程度塗った

3) : コンクリート内部に高分子保水材を圧入し、表面に種子を混合したバーク堆肥を所定の厚みに塗り付けた

4) : ベントナイト、肥料、種子、ピートモスを混合したものを、コンクリート内部に圧入した

5) : コンクリート制作時に、種子と肥料を混入した

※ 室内実験で用いた植物は、ケンタッキー31とクリーピングレッドフェスクである

※ 播種後約2ヶ月間（実験終了まで）は、室内で定期的に散水をおこない養生した

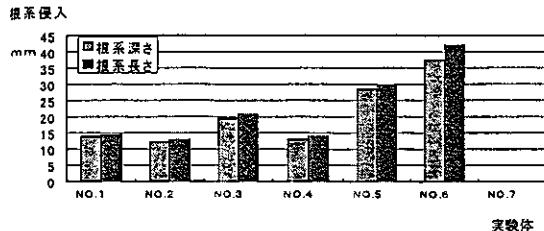


図-4 根系発達状況（播種後約2ヶ月）
Fig. 4 Root System Development Conditions
(approximately 2 months after sowing)

これらの図からも明らかなように、発芽本数や草丈の生育状況は他よりも劣るが、根の生育については、保水材等と共に種子をコンクリート内部に圧入したNo 6の実験体が最も良かった。

さらに、より自然に近い状態で放置した写真-2からも観察できるように、実験体No 6における植物の生育状態が他の実験体に比べ良いことがわかる。

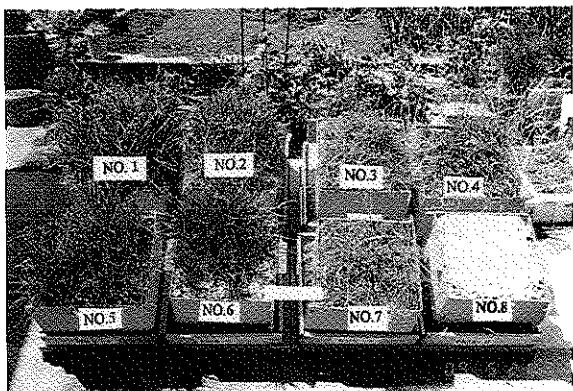


写真-2 植生生育状況（播種後約4ヶ月）

Photo 2 Vegetation Growth Conditions
(approximately 4 months after sowing)

また、コンクリート内部に保水性をもたせた実験体であるNo 5、No 6以外では、土壤材の層

厚が大きいものほど、植物の生育状態が良いと見受けられる。これは、層厚が大きいほど土壤内部の保水力があることによると推察できる。

これらのことより、エコロクリートを緑化基盤として用いる場合には、保水性が重要であり、コンクリート内部に保水性のある資材を充填するか、あるいは、コンクリート表面に適度な保水層を設けることが有効な手段であると考えられる。

なお、No 8 の実験体については、発芽が観測されず、普通コンクリートを基盤とした No 7 については、コンクリートへの根の侵入が確認できなかつた。

また、今回の報告では、コンクリートから溶出するアルカリ成分と植物の生育の関係に関する検討までにはいたらなかつた。

4-2 エコロクリートの活用方法

エコロクリートは、その特徴にも示したように、普通コンクリートと同様に、現場打ちでもブロックなどの二次製品としても対応できる。したがつて、水密性を要求されない箇所であれば、普通コンクリートと同じような使用が可能と考えられ、特に、構造体としての機能を保ちながら、生態系を保全・創造し、美しい自然景観が要求される箇所への適用が有効といえる。

例えば、練り積みなどの胴込め材として使用することにより、空積みと同様の効果を出すことや、現場打ち擁壁に緑化する場合の構造材として用いる事、さらには水衝部など強度を要する河川構造物の構造材としての利用などが考えられる。

また、二次製品としては、他の透水性コンクリートと同様に、緑化ブロックとしての利用や、強度を有することより、プレキャスト擁壁としての活用などがあげられる。

これらの活用イメージの一例を図-5、図-6に示す。

4-3 エコロクリートの使用事例

エコロクリート開発の歴史は浅く、また、今後の課題にも示すように、緑化方法などまだ改善すべき点があり、その使用例も現時点では数少ない。

なお、これまでに護岸等で使用された実績を表-4に示す。

表-4 エコロクリートの使用事例

Table 4 Precedents of "Ecolo-crete" Use

水系名	河川名	使用形態	施工規模
十勝川	螺湾川	コンクリート護岸	40 m ²
信濃川	大河津分水路	法粹工の中詰	472 m ²
信濃川	黒川放水路	法粹工の中詰	1,276 m ²
矢作川	北一色川	石積(張)の胴裏込め	57 m ²
矢作川	市木川	石積(張)の胴裏込め	80 m ²
矢作川	名倉川	石積(張)の胴裏込め	340 m ²
淀川	年谷川	床止工	370 m ²
淀川	宇陀川	コンクリート護岸	170 m ²
大和川	富雄川	法面	36 m ²
肱川	肱川	間知ブロック	1,000 m ²
渡川	四万十川	法粹工	460 m ²
渡川	後川	階段工	30 m ²

5. 今後の課題

エコロクリートの機能を整理したものを、図-7に示す。今後の機能展開としては、地下水の涵養や良好な水循環系への寄与、あるいは水質の浄化といった緑化基盤としての活用以外の利用が考えられる。今後、このような視点での研究も進めることを考えている。

また、緑化についても、現場打ちで実施したエコロクリートから溶出するアルカリ成分の植物への影響といった観点の調査や、緑化資材の開発も含めたより経済的な緑化手法の研究といったことを展開していく必要がある。

これらを実施することで、今後、さらにエコロクリートの活用範囲が広がるものと考える。

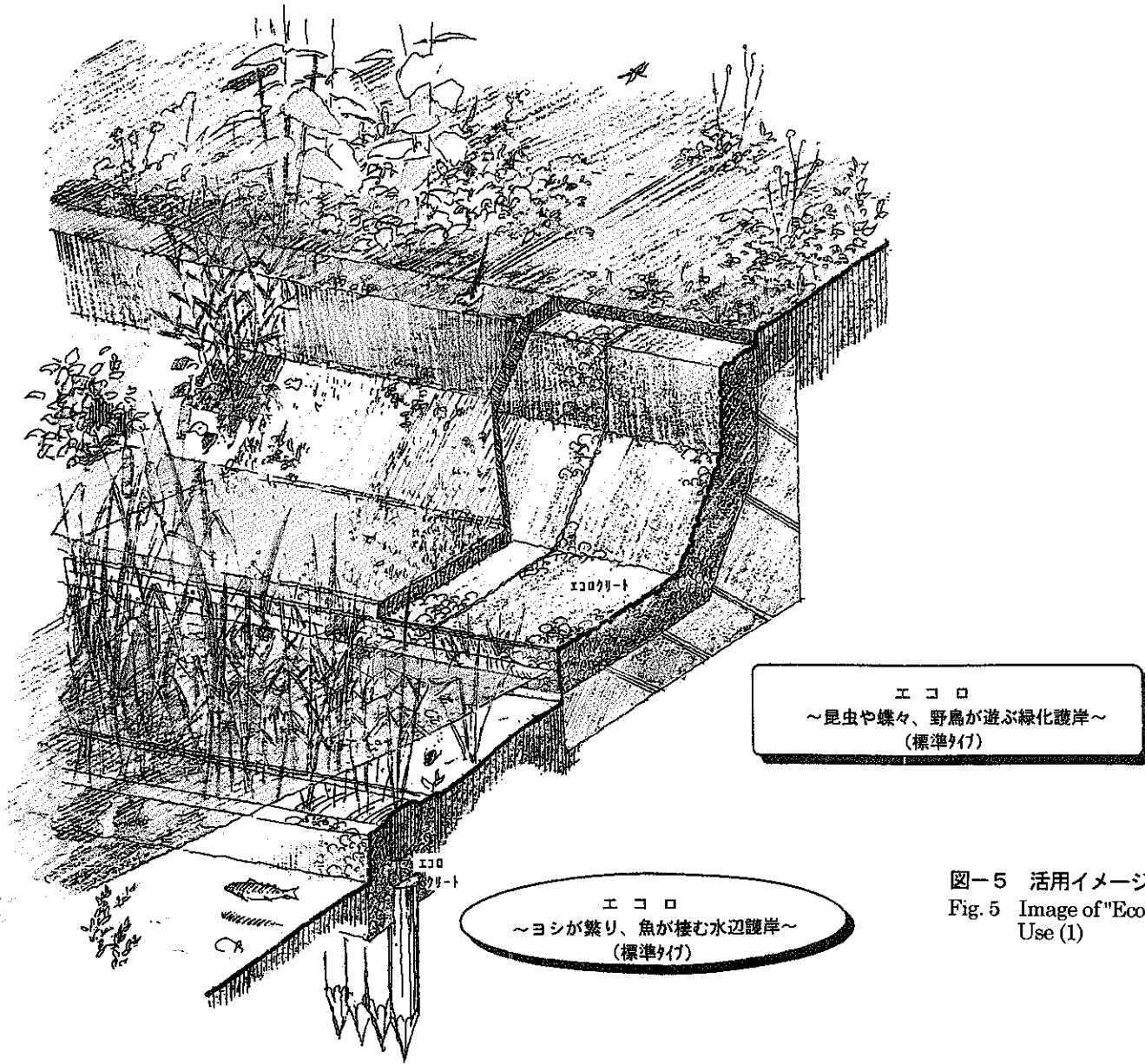


図-5 活用イメージ(1)
Fig. 5 Image of "Ecolo-crete"
Use (1)

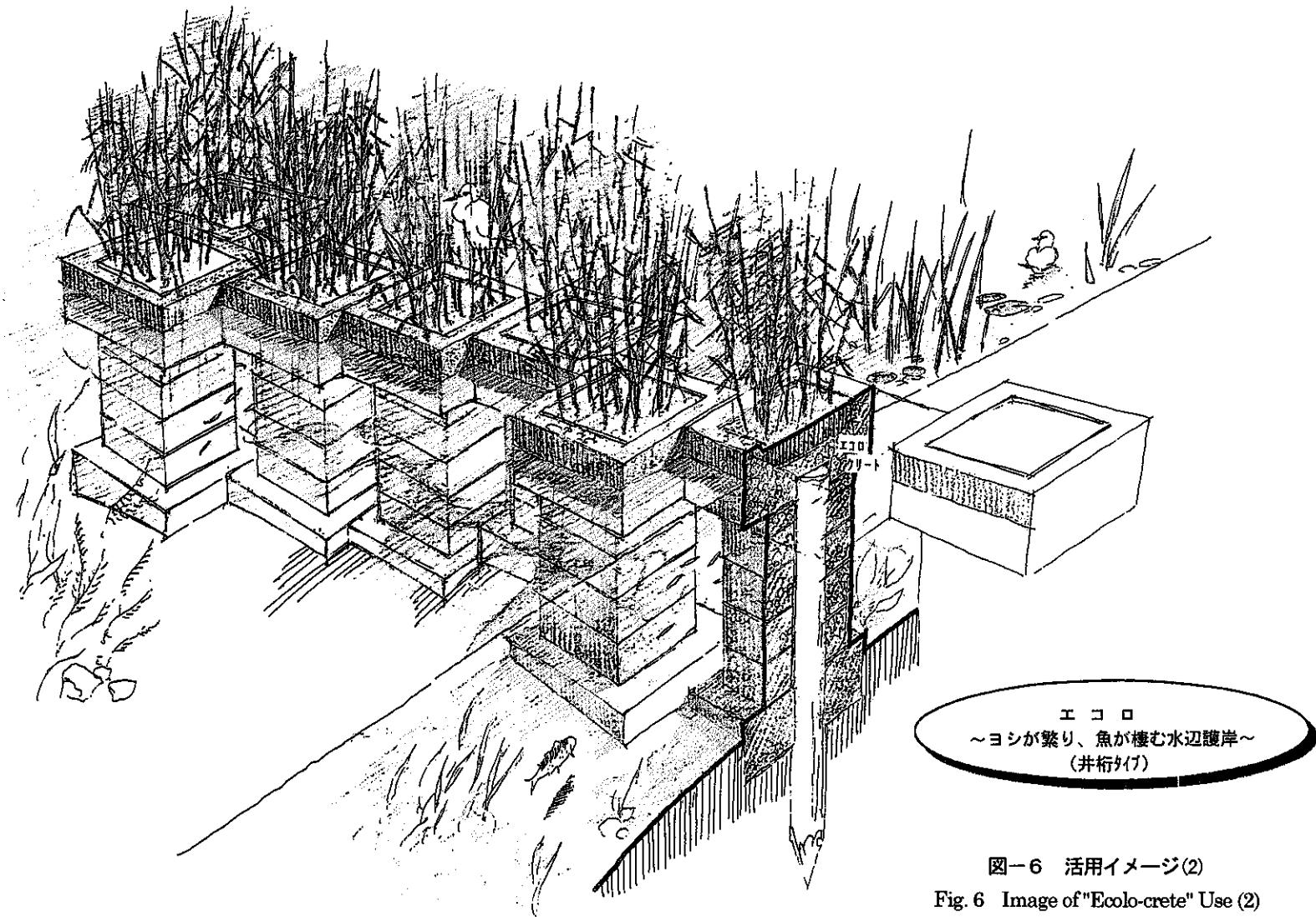


図-6 活用イメージ(2)
Fig. 6 Image of "Ecolo-crete" Use (2)

エコロクリートの機能展開

エコロクリート

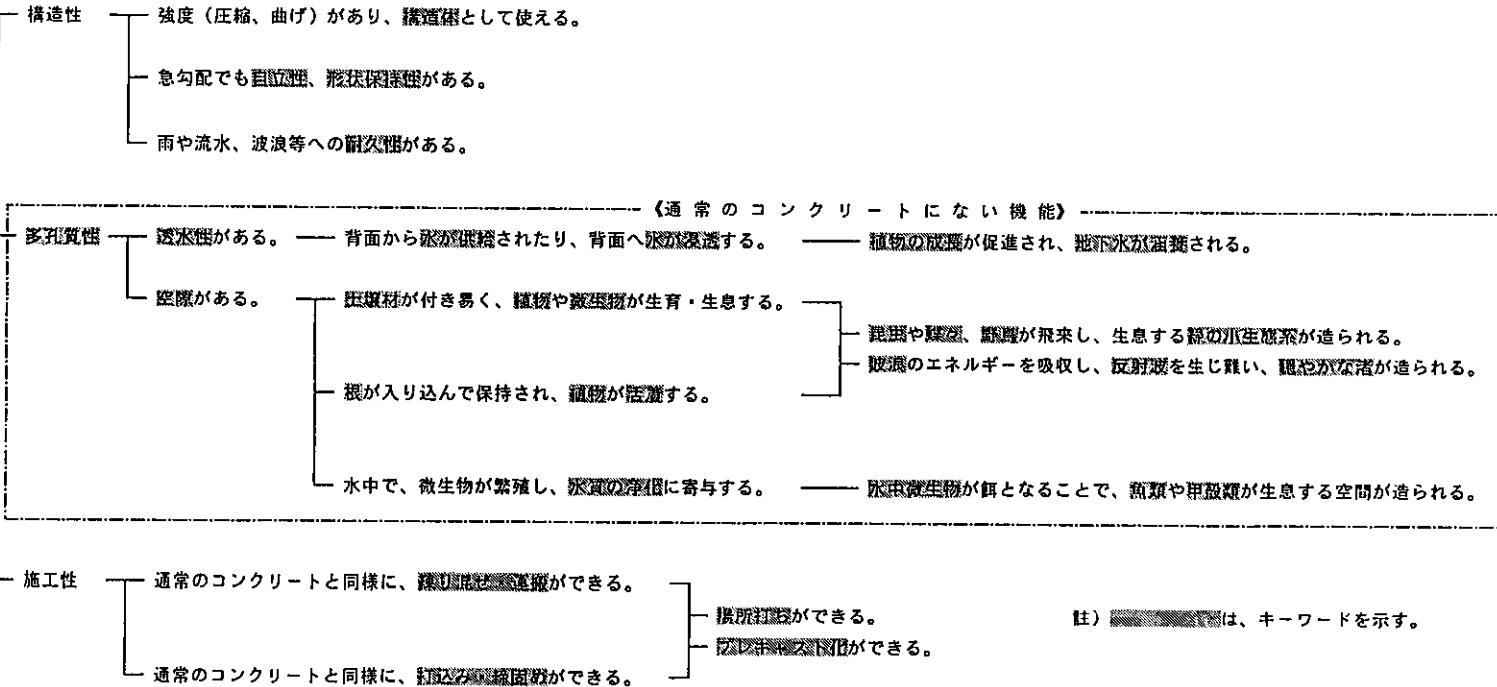


図-7 エコロクリートの機能展開

Fig. 7 Development of "Ecolo-crete" Functions

6. おわりに

このように、エコロクリートは“多自然型川づくり”にも役立つ技術であり、これをより広く活用するためには、その使用方法や適用可能性に関する研究を進める必要がある。そのためにも、より多くの現場で実際に経験を積むことが肝要であると考えられる。

なお、本研究は清水建設株式会社との共同研究で実施しているものである。

<参考文献>

- 1) 玉井元治・杉野守・芦田馨：連続空隙を有する緑化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報告集（1993）
- 2) 松川徹・玉井元治・杉野守・芦田馨：連続空隙を有する緑化コンクリートの配合と空隙に関する研究エココンクリートの現状と将来展望に関するシンポジウム論文報告集（1995）
- 3) 柳橋邦生・米沢敏男・佐久間護・池尾陽作・安藤慎一郎・半田栄一：緑化コンクリートの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報告集（1993）
- 4) 武川芳広・小野定・今井実：場所打ち透水性コンクリートの開発
土木学会第50回年次学術講演会（1995）
- 5) 吉森和人・岡本亨介・下山善英・堀口剛：植生ポーラスコンクリートの製造と耐久性に関する実験的研究
コンクリート構造物の緑化に関するシンポジウム論文報告集（1993）
- 6) 堀越信雄・箕輪宏和：緑化コンクリートブロックの開発に関する研究
リバーフロント研究所報告第4、5号（1993, 1994）