

植栽を目的としたポーラスコンクリートの長期耐久性に関する評価

唐沢明彦¹・小柳直昭²・高橋重松³・土田保⁴

摘要：ポーラスコンクリートによる河川護岸工法は、自然生態系の保全や景観性の向上が可能な工法として期待されている。一方、河川護岸には半永久構造物としての高い耐久性が求められるが、ポーラスコンクリートの実環境下における耐久性に関しては必ずしも明らかになっていない。このため、植栽を目的としたポーラスコンクリートの実環境下における長期耐久性を評価することを目的として、寒冷地の鉱山残壁および河川護岸に施工されたポーラスコンクリート製構造物の調査を実施した。その結果、植栽を目的としたポーラスコンクリートは、凍結融解作用が生じる寒冷地の実環境下において高い耐久性を有していることが確認された。

キーワード：植栽、ポーラスコンクリート、耐久性、凍結融解作用、鉱山、河川護岸

Key words :Vegetation, Porous concrete, Durability, Freezing and thawing action, Mine, River-revetment

1. はじめに

近年、地球規模での環境悪化を背景にして環境保全、環境改善への国民意識が高まっている。これに答えるべく、河川行政では、河川法の改正が1997年に実施され、河川法の目的として治水、利水に加えて、「河川環境の整備と保全」が位置付けられた。また、同じ1997年を初年度とする第9次治水事業7ヶ年計画において、従来からのコンクリート護岸に代わり「コンクリートのない川づくり」もしくは「コンクリートの見えない川づくり」を目指して、多自然型川づくりが積極的に実施されるようになった。

これに対して企業側でも自然環境や生活環境などに十分配慮した環境保全工法、環境改善工法の研究・開発が進められている。ポーラスコンクリートによる河川護岸工法は、従来のコンクリート河川護岸に類似した構造体に動植物の植生機能を付加できる多孔質（ポーラス）なコンクリートを用いる工法であり、自然生態系の保全や景観性の向上が可能な工法として注目を集めている。

一方、ポーラスコンクリートによる河川護岸工法は、比較的新しい工法であるため、実環境での施工の歴史が浅く、解決すべき課題も多い。ポーラスコンクリートの耐久性についても、実際の環境条件を考慮した種々の室内促進耐久性試験が行われているものの¹⁾、実環境下に施工された構造物での実証的なデータは少ない。

本報は、寒冷地の鉱山残壁および河川護岸に施工された植栽を目的としたポーラスコンクリート製構造物の耐久性を調査し、評価した結果について論ずる。

2. 調査地と緑化方法の概要

2.1 武甲鉱山採掘残壁

調査地は、埼玉県秩父市の南方にそびえる独立峰、武甲山（標高1,305m、北緯35°59'19"、東経139°5'19"）の北面に位置する三輪地区石灰石鉱山の採掘残壁である。武甲山は、1925年に秩父セメント（現：太平洋セメント）のセメント原料用石灰石の採掘鉱山として開設された。⁷⁶

年後の現在に至っても秩父太平洋セメント（現：武甲鉱山）三輪地区として採掘が続けられている。写真1に現在の武甲鉱山三輪地区の状況を示す。調査の対象となった武甲鉱山三輪地区下部中央採掘残壁は、標高440m～500m、傾斜40°～50°で石灰岩が階段状に重なった状態で形成されており、緑化が行われる以前は壁面に土はほとんど無く、植物はごく一部に自生しているにすぎなかった。

調査地は、1976年に崖崩れや異常出水等の災害防止と景観向上を目的として約8,000m²の残壁を対象として緑化が実施された。当時、鉱山残壁のように傾斜がきつく、土が存在しない個所の緑化には適切な方法が無く、全国各地の鉱山緑化事業の大きな課題となっていた。そのため、武甲鉱山では一つの試みとして、ポーラスコンクリート製植栽枠による緑化方法を開発した。この方法は、岩盤壁面上にポーラスコンクリートで土手状の枠を形成し、その中に客土し、植栽して緑化する方法である。ポーラスコンクリートを使用したのは、客土中の水を適度に保水または排水することにより植物の乾燥や根腐れによる枯死が生じにくいことや、配合の検討によって未硬化時の変形抵抗性が高められ、型枠を使用しなくても施工できること等を予備実験で確認したためである。



写真1 現在の武甲鉱山三輪地区の状況(2001年4月上旬)

¹⁾太平洋セメント株式会社 中央研究所

²⁾太平洋セメント株式会社 中央研究所（現：マエタ エコ ケア株式会社）

³⁾太平洋セメント株式会社 中央研究所（現：小野田ケミコ株式会社）

⁴⁾前田製管株式会社 技術開発部

ポーラスコンクリート製植栽枠は、客土の奥行が300mm～500mm、客土の厚さが200mm～300mmになるように、厚さ約150mmのポーラスコンクリートで残壁の地形に応じて形成された。施工は、簡単なせき板を用いて人手によりポーラスコンクリートを加圧することにより行われ、約8,000m²の残壁に87箇所のポーラスコンクリート製植栽枠が形成された。客土は、現場発生土の山砂を利用した。植物は、現地で調達できるコデマリ、コマツナギ、ツルマサキ、メドハギ、ヤマハギ、リョウブの6種から1箇所につき1～3種を選定し、植栽した。写真2に現在のポーラスコンクリート製植栽枠の状況を示す。

なお、植栽を目的としたポーラスコンクリート製構造物としては、供用25年を経過した本調査地のポーラスコンクリート製植栽枠が日本最初のものであると思われる。

2.2 大山川河川護岸

調査地は、山形県鶴岡市東茨新田地内(北緯38°43'27"、東經139°5'19")を流れる大山川の河川低水護岸である。大山川は、鶴岡市で日本海に流れ込む1級河川赤川の支流をなす2級河川である。調査地は、第9次治水事業7ヶ年計画に先駆けて1996年5月に「コンクリートの見えない川づくり」の一環として植栽ポーラスコンクリートブロックによる河川護岸工法が採用された。

調査地で採用された工法は、勾配1:2の碎石基礎の上に縦寸法500mm×横寸法500mm×高さ寸法120～60mmの中央部が凹んだ形状のプレキャストポーラスコンクリートブロックを谷積みで敷き並べ、目地部にモルタルを充填することによってブロックを一体化し、流水・流石・流木等から護岸を保護するものである。ブロックの中央部を凹んだ形状にしたのは、流水や風雨により運ばれる土砂をブロック上に堆積しやすくし、自然生態系の保全機能や景観性向上させるためである。また、ポーラスコンクリートの連続空隙内に無機系の特殊培土と状況に応じて植物種子を人工的に充填することにより、護岸全面に植物を繁茂させ、「コンクリートの見えない川」を創出するものである。写真3に現在の植栽ポーラスコンクリートブロック河川護岸の状況を示す。

3. ポーラスコンクリートの初期性状

3.1 配合

表1に両調査地のポーラスコンクリートの配合を示す。セメントは、両調査地ともに普通ポルトランドセメントを使用している。混和剤は、両調査地ともに高性能減水剤を使用している。粗骨材は、武甲鉱山では現地で採掘された20～5mmの石灰石を使用し、大山川では15～10mmの立谷沢産碎石を使用している。

3.2 物性

表2に両調査地のポーラスコンクリートの初期物性を示す。圧縮強度および空隙率測定用の直径100mm×高さ200mmの円柱供試体は、武甲鉱山については現地でコア抜きで採取し、大山川については工場出荷前にコア抜きで採取した。なお、両調査地のポーラスコンクリートの配合および初期物性を含めた構造仕様は、現在のポーラスコンクリート河川護岸の標準構造仕様に適合するものである。²⁾

4. 調査結果

4.1 調査地の環境条件

表3に両調査地における冬夏季の気象を示す。これは、両調査地に最も近い秩父特別地域気象観測所および酒田測候



写真2 現在のポーラスコンクリート製植栽枠の状況
(2001年4月上旬)

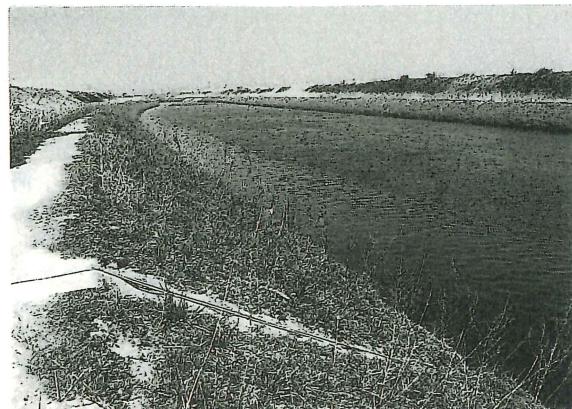


写真3 現在の植栽ポーラスコンクリート河川護岸の状況
(2001年4月下旬)

表1 ポーラスコンクリートの配合*

| 調査地 | W/C (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | |
|------|---------|--------------------------|------|------|-----|
| | | 水 | セメント | 粗骨材 | 混和剤 |
| | | W | C | G | SP |
| 武甲鉱山 | 20 | 57 | 286 | 2291 | 4.3 |
| 大山川 | 20 | 68 | 363 | 2140 | 7.3 |

*空気量を0%とした配合

表2 ポーラスコンクリートの初期物性

| 調査地 | 圧縮強度 (MPa) | 連続空隙率 (%) |
|------|------------|-----------|
| 武甲鉱山 | 10.1 | 28.1 |
| 大山川 | 11.4 | 30.9 |

表3 調査地における冬夏季の気象 (1971～2000年平均値)

| 調査地 | 気象項目 | 1月 | 2月 | 7月 | 8月 |
|------------------------|------------|----------|-----------|-----------|------------|
| | | 平年気温 (℃) | 日最高気温 (℃) | 日最低気温 (℃) | 降水量合計 (mm) |
| 武甲 鉱山 ¹⁾ | 日最高気温 (℃) | 8.8 | 9.2 | 28.9 | 30.5 |
| | 日最低気温 (℃) | -4.8 | -3.9 | 19.7 | 20.9 |
| | 降水量合計 (mm) | 30.3 | 40.3 | 157.5 | 227.2 |
| | 積雪日数 (日) | 2.5 | 2.8 | 0.0 | 0.0 |
| | 平年気温 (℃) | 1.5 | 1.4 | 23.2 | 24.9 |
| 大山川 ²⁾ | 日最高気温 (℃) | 4.1 | 4.3 | 27.0 | 29.1 |
| | 日最低気温 (℃) | -1.3 | -1.6 | 19.7 | 21.0 |
| | 降水量合計 (mm) | 152.6 | 115.3 | 186.1 | 175.8 |
| | 積雪日数 (日) | 25.1 | 22.2 | 0.0 | 0.0 |

1) 秩父特別地域気象観測所 観測・統計

2) 酒田測候所 観測・統計

所の観測・統計によるものである。武甲鉱山は秩父山地に、大山川は出羽山地と朝日山地に囲まれており、両調査地ともに冬季には日最低気温の月平均値が摂氏0°C以下となり、積雪もある地域であるため、ポーラスコンクリートには凍結融解作用が生じることが分かる。また、両調査地とともに8月には日最高気温の月平均値が摂氏29°C以上となり、降雨量も合計150mm以上であるため、ポーラスコンクリートには乾湿繰り返し作用が生じることが予想される。

4.2 ポーラスコンクリートの凍結融解サイクル

両調査地のポーラスコンクリートが供用期間中に受けた凍結融解サイクルを推定するため、2000年12月～2001年3月にかけて両調査地のポーラスコンクリートの表面温度を測定した。測定にはT型熱電対を使い、データロガーにより1時間間隔で記録した。測定点は、武甲鉱山のポーラスコンクリート製植栽枠では任意個所の側面中心部1点とした。大山川の植栽ボーラスコンクリート河川護岸では任意個所の法面中間部の気中で1点、冬季水位の水面下50cmで1点の計2点とした。大山川の気中は、測定点周辺50cm四方の植物と堆積した土砂を取り除き、ポーラスコンクリートを露出した状態として熱電対を設置した。

図1に武甲鉱山のポーラスコンクリート製植栽枠表面温度の経時変化の一例を示す。(2001年1月21日)ポーラスコンクリート製植栽枠の表面温度は、外気温と連動して0°Cを跨いで上昇・下降し、凍結融解作用が生じていることが分かる。

図2に測定期間における外気温とポーラスコンクリート製植栽枠表面温度の関係を示す。この一次回帰式から、外気温が0.82°C以下になるとポーラスコンクリート製植栽枠の表面温度が0°C以下になると推察される。1976年5月から2001年5月に至る供用25年で、外気温が0.82°Cを跨いで下降・上昇したサイクルは、秩父特別地域気象観測所の観測・統計から2,375回であり、ポーラスコンクリート製植栽枠が供用期間25年中に受けた凍結融解サイクルは、1年当たり約95回、25年合計で2,375回であると推定できる。

図3に大山川の植栽ボーラスコンクリート河川護岸表面温度の経時変化の一例を示す。(2001年1月20日)水面下50cmのポーラスコンクリート表面温度は、外気温よりも若干高い温度で連動しており、0°Cを跨いで下降・上昇し、凍結融解作用が生じていることが分かる。これに対して、気中のポーラスコンクリート表面温度は、外気温の変動にかかわらず、約1°Cで一定しており、凍結融解作用が生じていないことが分かる。

図4に測定期間における外気温と水面下50cmのポーラスコンクリート表面温度の関係を示す。この一次回帰式から、外気温が-2.91°C以下になると水面下50cmのポーラスコンクリート表面温度が0°C以下になると推察される。1996年5月から2001年5月に至る供用5年で、外気温が-2.91°Cを跨いで下降・上昇したサイクルは、酒田測候所の観測・統計から63回であり、水面下50cmのポーラスコンクリートが供用期間5年中に受けた凍結融解サイクルは、1年当たり約13回、5年合計で63回であると推定できる。

図5に測定期間における外気温と気中のポーラスコンクリート表面温度の関係を示す。図3と同様に、この相関図からも気中のポーラスコンクリート表面温度は、外気温の変動にかかわらず、約1～3°Cで一定しており、凍結融解作用が生じていないことが分かる。このように、大山川の気中のポーラスコンクリートの表面温度が武甲鉱山の気中のポーラスコンクリートの表面温度と異なり、外気温の変動にかかわ

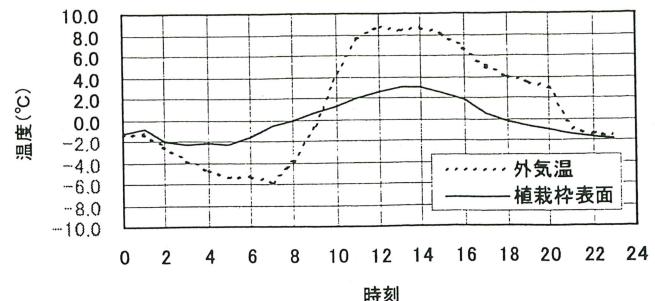


図1 武甲鉱山のポーラスコンクリート製植栽枠表面温度の経時変化の一例

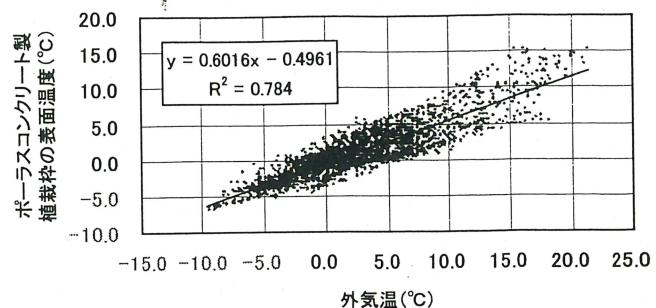


図2 外気温とポーラスコンクリート製植栽枠表面温度の関係 (2000年12月～2001年3月)

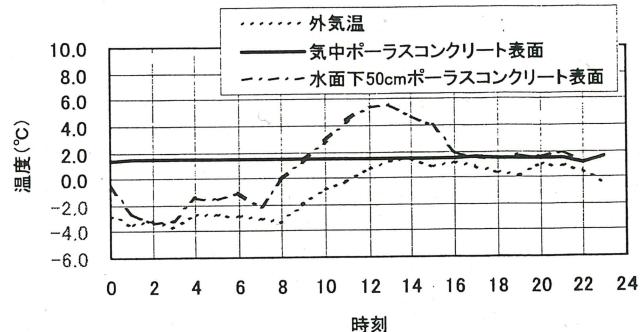


図3 大山川の植栽ボーラスコンクリート河川護岸表面温度の経時変化の一例

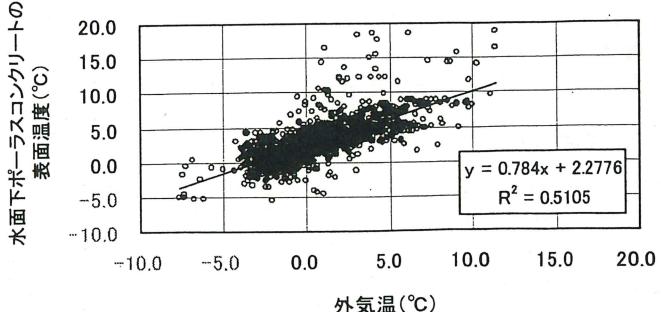


図4 外気温と水面下50cmのポーラスコンクリート表面温度の関係

らず、0°C以上で一定しているのは、低水護岸上に繁殖した植物および流水、風雨により堆積した土砂による断熱効果および保温効果によるものであると考えられる。なお、測定点

は測定開始時に周辺の植物と堆積した土砂を取り除いていたため、本来の植栽ポーラスコンクリート低水河川護岸であれば植物と堆積土砂によるさらに優れた断熱効果および保温効果が期待でき、凍結融解作用はほとんど生じないものと考えられる。

4.3 ポーラスコンクリートの耐久性評価

4.3.1 目視観察 両調査地のポーラスコンクリートが凍結融解作用により劣化した場合を想定し、その破壊形態を把握するため、両調査地と同様の配合で角柱供試体を作製し、ASTM C666 A法（水中凍結水中融解法）に準拠した凍結融解試験を行った。この結果、凍結融解作用による劣化が進行するとCrackingやPop out（粗骨材および周辺のセメントペーストがクレーター状に抜け落ちる状態）が生じ、さらに劣化が進行するとバラバラに崩壊することが分かった。

劣化が生じた角柱供試体と両調査地から切り出した供試体を比較しながら目視観察したが、両調査地から切り出した供試体にはCrackingやPop outは生じておらず、供用初期と同等の外観を保持していることを確認した。写真4に目視観察の状況を示す。なお、ASTM C666 A法による凍結融解試験は、河川護岸等の実環境下のポーラスコンクリートの凍結融解作用を的確に再現しているとは言い難いとの指摘があり、この試験で劣化したポーラスコンクリートが耐久性に劣るとはいえない。¹⁾

4.3.2 圧縮強度 図6に両調査地のポーラスコンクリートの圧縮強度の経時変化を示す。圧縮強度は、円柱供試体を初期物性評価と同様の方法で、表面温度の測定点周辺から5本採取し、その平均値を示した。両調査地のポーラスコンクリートの圧縮強度は、供用初期と比較してほぼ同等であり、武甲鉱山のポーラスコンクリート製植栽枠においては供用25年、大山川の植栽ポーラスコンクリート河川護岸においては供用5年を経過しても供用初期と同等の強度を保持していることを確認した。

4.3.3 植栽機能 両調査地のポーラスコンクリート製構造物は、植栽を主な目的としたものであるため耐久性上問題がなくても、植栽機能が低下すれば問題となる。両調査地のポーラスコンクリートは写真2、写真3に示したように目視観察から植栽機能にはまったく問題はない。さらに、武甲鉱山のポーラスコンクリート製植栽枠において、2000年12月～2001年4月にかけて定期的に採取した客土の含水比は、供用初期に確認した含水比とほぼ同等の40～15%であり、植物が枯死しない程度の含水比を常に保持していることを確認した。また、写真4に示すようにポーラスコンクリート表面にも苔や各種植物が活着していることを確認した。

5. おわりに

気中で2,375回程度の凍結融解サイクルを経たと思われるポーラスコンクリート製植栽枠、ならびに水際で63回程度の凍結融解サイクルを経たと思われるポーラスコンクリート河川護岸において、外観、強度および植栽機能は供用初期と比較して低下しておらず、高い耐久性を有していることが実証的に確認できた。さらに、河川の低水護岸においては、護岸上に繁殖した植物および流水、風雨により堆積した土砂による断熱効果および保温効果により、寒冷地であっても凍結融解作用がほとんど生じないであろうことが確認できた。本調査から、ポーラスコンクリート河川護岸工法や本報で紹介したポーラスコンクリート製植栽枠による植栽工法は、凍結融解作用が生じる寒冷地においても有効な環境改善工法であることが実証できた。

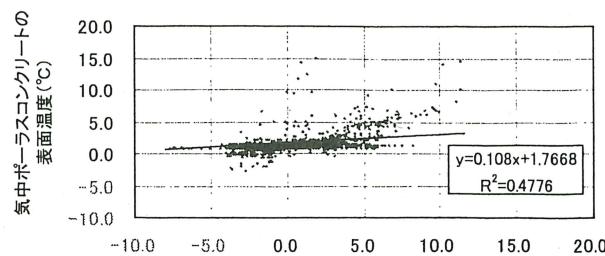


図5 外気温と気中のポーラスコンクリート表面温度の関係

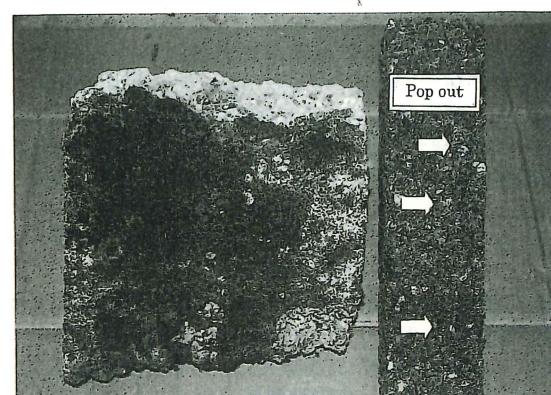


写真4 目視によるポーラスコンクリート表面の観察状況

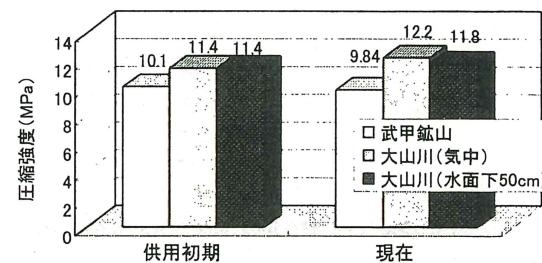


図6 圧縮強度の経時変化

しかしながら、ポーラスコンクリート製構造物は、その用途や地域、適用箇所によっては乾湿繰り返しによって耐久性が低下するとの指摘がある。¹⁾この点について実証的な確認を行うため、全国各地のポーラスコンクリート製構造物の調査を継続的に実施していく予定である。

武甲鉱山採掘残壁のポーラスコンクリート製植栽枠による緑化工法は、旧秩父セメント株式会社（現：太平洋セメント株式会社）の神田衛博士の創案、開発により実現したものであり、現在のポーラスコンクリートを使った緑化工法の先駆者としての功績は多大なものであります。同工法の研究・開発に携わる技術者として心より尊崇と感謝の意を表します。

引用文献

- 1) 国土交通省土木研究所（2001）ポーラスコンクリートの強度および耐久性試験報告、土木研究所資料 第3799号
- 2) 財団法人 先端建設技術センター 編（2001）ポーラスコンクリート河川護岸工法の手引き、山海堂：20～25

(2001.7.1 受理)