

地球温暖化対策のための牡蠣殻ポーラスコンクリートの 緑化性能向上に関する研究

堀口 至（呉工業高等専門学校環境都市工学分野）

E-mail: horiguti@kure-nct.ac.jp

1. はじめに

現在、地球環境問題の深刻化が進んでおり、なかでも地球温暖化対策は、地球全体にとって重要な課題である。そのため日本を含む世界各国が、2050 年までに CO₂ を含む温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする、カーボンニュートラルを目指している。具体的な対策として、CO₂ 自体の排出量の減少が大切であることはもちろんであるが、都市構造物の屋上や壁面緑化の推進といった CO₂ の吸収源対策も重要である。なお、構造物の屋上や壁面緑化などは、自然環境が有する機能を社会における様々な課題解決に活用しようとするグリーンインフラの一種である¹⁾。

一方、広島県は全国有数の牡蠣の生産地である。令和 4 年度広島かき生産出荷指針²⁾によると、令和 2 年度の全国のむき身牡蠣の総生産量 27,787 トンに対して、広島県の生産量は 17,358 トンであり、日本の生産量の 62.5%を占めている。しかし、その一方で、牡蠣生産の副産物として牡蠣殻が、年間約 10 万トン産出されている。現在、牡蠣殻の一部は飼料や肥料として利用されているがその利用量は限られており、牡蠣殻堆積場や牡蠣殻処理工場には多量の牡蠣殻がストックされている(図 1)。そのため、安定的に牡蠣殻を再利用するためには、牡蠣殻の新たな再利用方法を検討することが望ましく、建設材料の 1 つであるポーラスコンクリートへの適用が検討されている。



図 1 牡蠣殻堆積場(左)および牡蠣殻処理工場(右)

ポーラスコンクリートは、粗骨材同士の接点間をセメントペーストまたはモルタルにより結合して、内部に連続した空隙を有しているものであり、透水性、保水性に優れている。既往の研究では、破碎した牡蠣殻を粗骨材として用いた牡蠣殻ポーラスコンクリート(OyPoC: Oyster Shell Porous Concrete)の植生基盤材料への適用性が検討されている³⁾。1年を超える植栽試験より、粒径 0.3~5.0mm の牡蠣殻骨材を用いた OyPoC は、高温で降水量が少ない夏季以外は、水やりを行わなくても高い緑化性能を示すことがわかっている。

以上のように、既に OyPoC の植生基盤材料適用の可能性があることはわかっているが、骨材粒径 0.3~5.0mm の OyPoC による限定的な試験結果である。そのため、さらに高い緑化性能を持った OyPoC を開発することを目的として、配合条件を広げて OyPoC の植生基盤材料への適用性を検討する必要がある。本研究は、骨材粒径の異なる OyPoC を用いて、5ヶ月間の植栽試験を実施し、OyPoC の緑化性能を明らかにすることを研究目的とする。また、OyPoC の空隙率、圧縮強度、透水係数といった基礎特性についても試験を行った。

2. 試験概要

2.1 供試体概要

本研究では、広島県呉市にある牡蠣殻堆積場より採取した牡蠣殻を用いた。堆積場より採取した牡蠣殻には塩分や海藻といった不純物が付着し、セメントの水和反応に悪影響を与える可能性がある。そのため、牡蠣殻を公称容量 70L の傾胴式ミキサで水を取り替えて3回洗浄し、不純物を洗い流した。水洗いした牡蠣殻は天日干しで乾燥させ、貝殻破碎機により破碎した。破碎した牡蠣殻はふるいを用いて、骨材粒度の範囲が広い連続粒度の 5.0~0.3mm と、粒度範囲が狭い単粒度の 10.0~5.0、5.0~2.5、2.5~1.2mm の4種類に分級した(図 2)。また、比較用として 5.0~2.5mm の碎石と、2.5~1.2、1.2~0.6mm の砕砂から分級して作製した単粒度の砕砂も用いた。

表 1 に使用骨材の物理的性質、表 2 に供試体の示方配合を示す。本研究では、アルカリ分による植物育成への悪影響を抑えるため、セメントには高炉セメント B 種(密度: 3.04g/cm³)を用い、練混ぜ水は水道水、混和剤には高性能 AE 減水剤を用いた。水セメント比 W/C は全て 25%、骨材ペースト容積比 p/a は 30%とした。練混ぜは公称容量 10L のオムニミキサを使用した。基礎特性試験にはφ100×200mm の円柱供試体を用い、植栽試験には 300×300×100mm の平板供試体を用いた。碎石および砕砂ポーラスコンクリート(NPoC: Normal Porous Concrete)の供試体も作製した。供試体は型枠に1層で試料を詰め、供試体の締固めには、テーブルバイブレーターで10秒間振動を加えた後、打設面を型枠振動機で平らにした。打設後24時間は十分に湿らせた麻布を被せ供試体の乾燥を防ぎ、供試体が硬化した後に脱型を行い、水温 20±2°C の養生槽に6日間浸漬した。



図2 牡蠣殻骨材作製状況

表1 骨材の物理的性質

| | 粒径 (mm) | 密度 (g/cm ³) | | 吸水率 (%) | 単位体積重量 (kg/L) | 実積率 (%) |
|-----|------------|-------------------------|------|------------|------------------|------------|
| | | 表乾 | 絶乾 | | | |
| 牡蠣殻 | 5.0~0.3 | 2.08 | 1.76 | 17.9 | 0.917 | 52.0 |
| | 10.0~5.0 | 1.99 | 1.59 | 25.3 | 0.823 | 51.8 |
| | 5.0~2.5 | 2.04 | 1.74 | 17.0 | 0.705 | 40.4 |
| | 2.5~1.2 | 2.01 | 1.67 | 20.3 | 0.673 | 40.2 |
| 碎石 | 5.0~2.5 | 2.65 | 2.62 | 1.0 | 1.553 | 59.2 |
| 砕砂 | 2.5~1.2 | 2.65 | 2.62 | 1.1 | 1.559 | 59.5 |
| | 1.2~0.6 | 2.64 | 2.60 | 1.4 | 1.530 | 61.4 |

表2 供試体の示方配合

| 供試体 | 骨材粒径 (mm) | W/C (%) | p/a (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | | | |
|---------|--------------|------------|------------|--------------------------|-----|-----|------|------|------|
| | | | | W | C | Oy* | G | S | Ad |
| Oy5003 | 5.0~0.3 | 25 | 30 | 60 | 241 | 928 | | | 1.21 |
| Oy10050 | 10.0~5.0 | | | 43 | 171 | 634 | | | 0.86 |
| Oy5025 | 5.0~2.5 | | | 47 | 189 | 744 | | | 0.94 |
| Oy2512 | 2.5~1.2 | | | 54 | 217 | 833 | | | 1.08 |
| N5025 | 5.0~2.5 | | | 71 | 285 | | 1459 | 1.42 | |
| N2512 | 2.5~1.2 | | | 77 | 271 | | | 1466 | 1.35 |
| N1206 | 1.2~0.6 | | | 71 | 283 | | | 1441 | 1.41 |

*Oy: 単位牡蠣殻骨材量

2.2 基礎特性試験方法

基礎特性試験では、空隙率、圧縮強度、透水係数、含水量、揚水高さを求めた。供試体は空隙率、圧縮強度、透水係数測定では、Oy5003、Oy10050、Oy5025、Oy2512、N5025、N2512、N1206 の 7 種類、保水性と揚水性は Oy5003、Oy5025、N5025、N2512、N1206 の 5 種類を用いた。

空隙率試験は、JCI-SPO2-1「ポーラスコンクリートの空隙率試験方法(案)」を参考に、質量法により求めた。まず、打設時に型枠に打ち込んだ試料の重さ W_1 (kg) を測定し、養生終了後に供試体の寸法を測定して V_1 (m³) を求め、式 1 を用いて空隙率 A_t (%) を求めた。

$$A_t = \left(1 - \frac{W_1/V_1}{W_2/V_2}\right) \times 100 \quad \text{式 1}$$

ここに、 W_2 : コンクリート 1m³ あたりの各材料の質量和(kg)、 V_2 : コンクリート 1m³ あたりの各材料の絶対容積の和(m³)とする。

圧縮強度試験は、JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準拠し、アムスラー型万能試験機を用いて行った。供試体上面と下面の両方には硫黄キャッピングを行い、OyPoC および NPoC の載荷速度は、それぞれ毎秒 0.01N/mm²、0.1N/mm² とした。

透水試験は、JCI-SPO3-1「ポーラスコンクリートの透水試験方法(案)」に準拠して自作した器具を用いて行った。図 3 に透水試験装置図を示す。動水勾配が 0.2 に近づくように水頭差 H (mm) を 40mm 程度にして試験を行い、式 2 を用いて透水係数 K (cm/sec) を算出した。

$$K = \frac{Q}{TA} \times \frac{h}{H} \quad \text{式 2}$$

ここに、 Q : 透水量 (cm³)、 T : 試験時間 (sec)、 A : 供試体断面積(cm²)、 h : 供試体高さ(mm) とする。

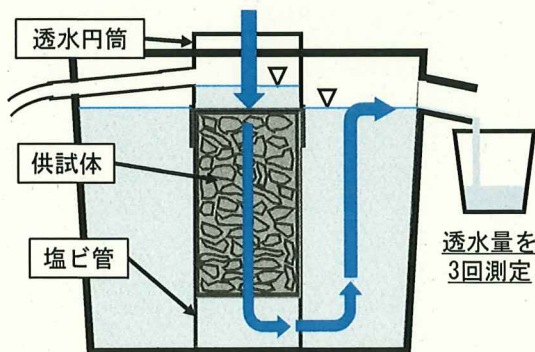


図 3 透水試験装置図

保水試験では、JIS A 5371「プレキャスト無筋コンクリート製品」を参考にし、含水量を測定した。水中養生終了後の供試体を、密閉式のプラスチック容器に入れ、30分間水を切った後、直ちに質量を計測し、この質量を湿潤質量 m_w (g) とした。その後、温度 $105 \pm 5^\circ\text{C}$ の乾燥炉内で2日間乾燥させて絶乾質量 m_d (g) を測定した。図4に保水試験状況を示す。含水量 W_r (g/cm³) の算出式を式3に示す。

$$W_r = \frac{m_w - m_d}{V} \quad \text{式 3}$$

ここに、 V ：供試体の体積 (cm³) とする。



図4 保水試験状況

揚水試験では、含水量測定後の絶乾状態の供試体を用いて試験を行った。試験では、絶乾状態の供試体を底面から約50mmが水に漬かるよう浸漬させ、1時間後の供試体が水を吸い上げて変色している部分の底面からの高さを4か所測定し、測定高さと水位の差から揚水高さを求めた(図5)。

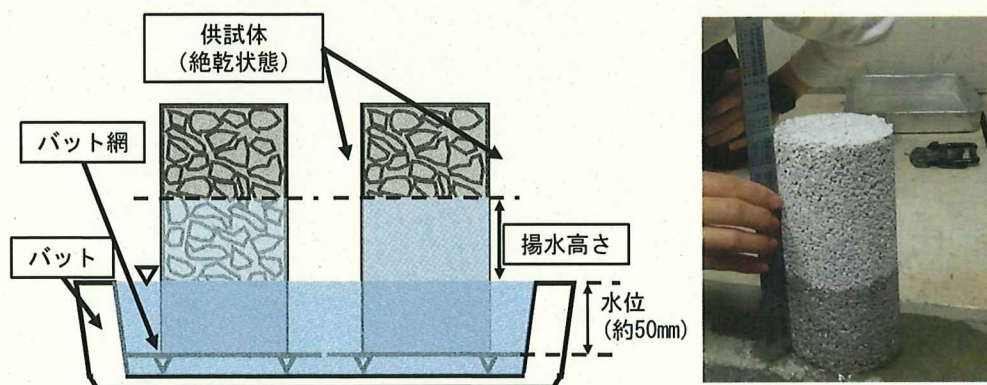


図5 揚水試験装置図

2.3 植栽試験方法

図6に植栽試験の概略図を示す。試験は、上面に芝を張った供試体を水の溜められるコンテナの中に入れ、環境都市工学科棟屋上に設置して行った。供試体は、Oy5003、Oy5025、Oy2512、N5025、N2512、N1206の6種類を測定時に水やりを行うものと、降雨のみのもので2枚ずつ作製した。緑化性能の評価方法は、含水率測定と緑被レベルの判定とし、試験開始から週に2回ずつ測定した。緑被レベルは、供試体上面の芝を真上から撮影した写真を用いて、芝を9×9マスのメッシュで細分化し、マス毎に緑で覆われている割合をレベルで判定して平均値を取るものである。レベルの判定は、芝が枯れている状態をレベル0、全面緑の芝で覆われている状態をレベル5の6段階評価とした(図7)。試験期間は2022年7月6日から2022年12月9日までの155日間とし、試験終了後、供試体への芝の根の伸長さ確認を行うために供試体の割裂を行った。

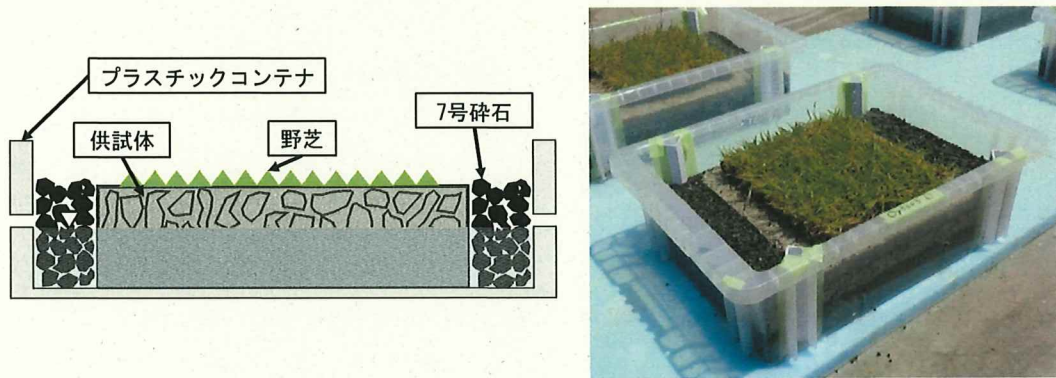


図6 植栽試験概略図

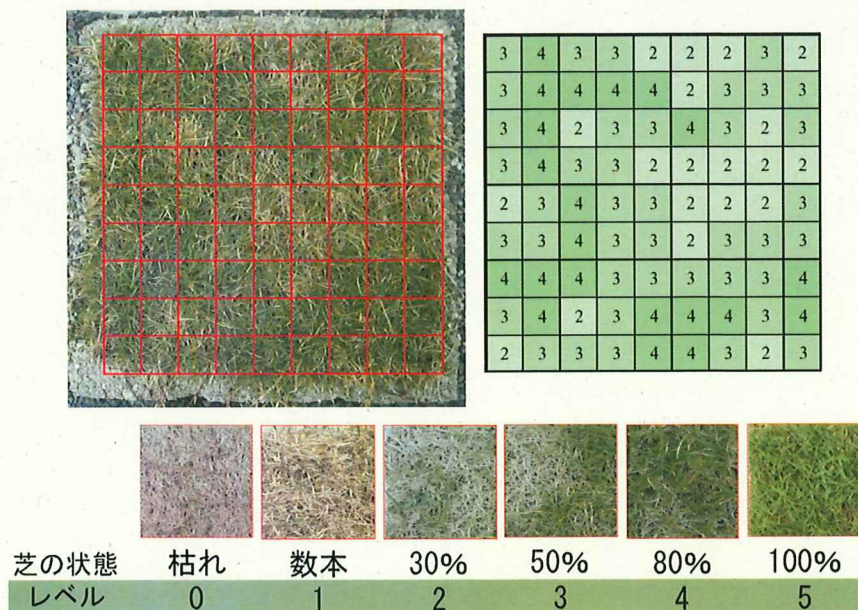


図7 緑被レベル判定方法

3. 試験結果および考察

3.1 基礎特性試験結果

図 8 に、OyPoC と NPoC における、圧縮強度と空隙率の関係および透水係数と空隙率の関係を示す。図より、NPoC は骨材粒径によらず空隙率の低下に伴い、圧縮強度は増大する傾向を示したが、OyPoC は全ての供試体で 2N/mm^2 以下の全体的に低い値を示すことがわかる。一方、透水係数は OyPoC、NPoC とともに空隙率が小さい、または粒径の小さい骨材を含む供試体の透水係数が小さくなる傾向を示した。

図 9 に、OyPoC と NPoC における、含水量と空隙率の関係および揚水高さとの関係を示す。図より、OyPoC と NPoC の含水量と揚水高さは、空隙率が大きい、または粒径の小さい骨材を含む供試体の値が大きくなる傾向を示すことがわかる。ただし、最も高い含水量を示したのは Oy5003 であるのに対して、揚水高さが最も高いのは N1206 であった。

一般に、ポーラスコンクリートの性能は、空隙率や空隙径に強く影響を受ける。同一 p/a の供試体でも OyPoC の方が NPoC よりも空隙率は大きく、粒径の小さい骨材を含む供試体の方が空隙径は小さくなる。そのため、難透水性、保水性、揚水性は連続粒度の OyPoC や骨材粒径の小さいポーラスコンクリートの値が高くなる。ただし、圧縮強度については骨材強度も関係してくるため、全ての OyPoC の値はほぼ同じになったと考えられる。

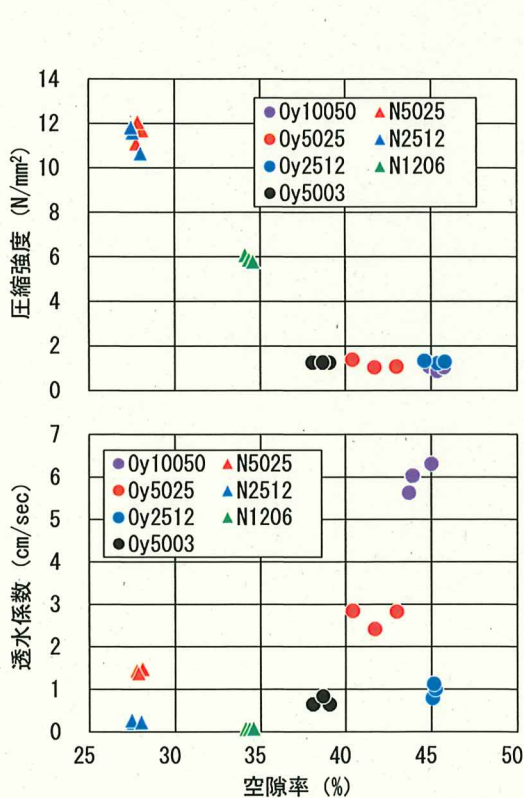


図 8 圧縮強度および透水係数と空隙率の関係

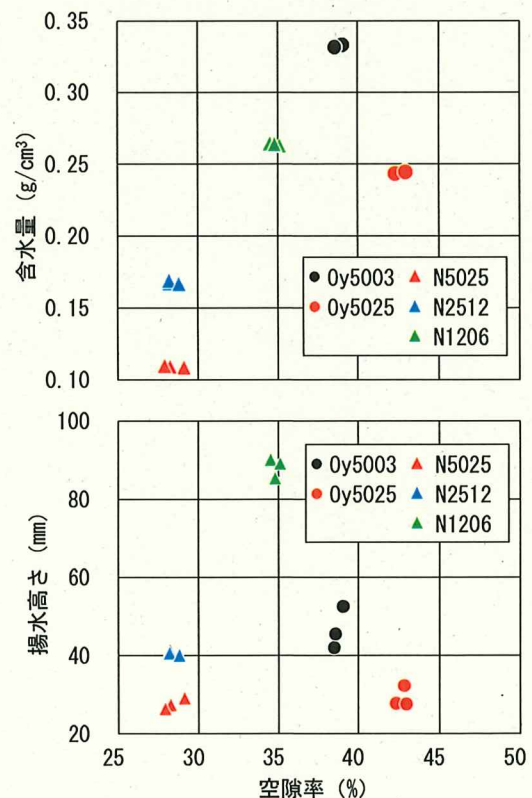


図 9 含水量および揚水高さとの空隙率の関係

3.2 植栽試験結果

2022年7月6日～12月9日の155日間の植栽試験について、7月6日、8月2日、9月2日、10月5日、11月4日、12月2日の芝の生育状況を、図10に水やりありの供試体の試験結果を、図11に水やりなしの供試体の試験結果を示す。

| 日付 | 0y5003 | 0y5025 | 0y2512 | N5025 | N2512 | N1206 |
|------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|
| 7/6 | | | | | | |
| 8/2 | | | | | | |
| 9/2 | | | | | | |
| 10/5 | | | | | | |
| 11/4 | | | | | | |
| 12/2 | | | | | | |

図10 芝の生育状況(水やりあり)

| 日付 | Oy5003 | Oy5025 | Oy2512 | N5025 | N2512 | N1206 |
|------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|
| 7/6 | | | | | | |
| 8/2 | | | | | | |
| 9/2 | | | | | | |
| 10/5 | | | | | | |
| 11/4 | | | | | | |
| 12/2 | | | | | | |

図 11 芝の生育状況(水やりなし)

2022年7月6日～12月9日の155日間の植栽試験における緑被レベルと含水率の経時変化について、図12に水やりありの供試体の試験結果を、図13に水やりなしの供試体の試験結果を示す。図より、水やりありの供試体では、Oy5003、Oy5025、Oy2512、N1206の緑被レベルが気温の高くなる7月から8月にかけて一旦低くなるものの、試験開始から9月終わり頃までレベル4程度の高い値を示した。10月以降は気温が低下するため徐々に芝が枯れていき、緑被レベルも低くなっていった。一方、N5025は試験開始から1週間以内に、N2512は1ヶ月以内に完全に枯れ、緑被レベルも0になっていた。

水やりなしの供試体では、試験期間の全体を通してOy5025が最も高く、次いでOy2512が高い緑被レベルを示していた。水やりありで良好な結果を示していたOy5003は完全に枯れていないが、8月中旬以降は、1以下の緑被レベルとなっていた。一方、NPoCでは、全ての供試体において試験開始から1ヶ月以内に緑被レベルは0になっていた。

芝の含水率データを確認すると、水やりありでは芝が1ヶ月以内に枯れたN5025、N2512は含水率が低く、緑被レベルと含水率にある程度相関がみられたが、水やりなしでは8月中旬以降に芝が枯れたOy5003、N1206の含水率が高い値を示し、緑被レベルとの相関性はみられなかった。

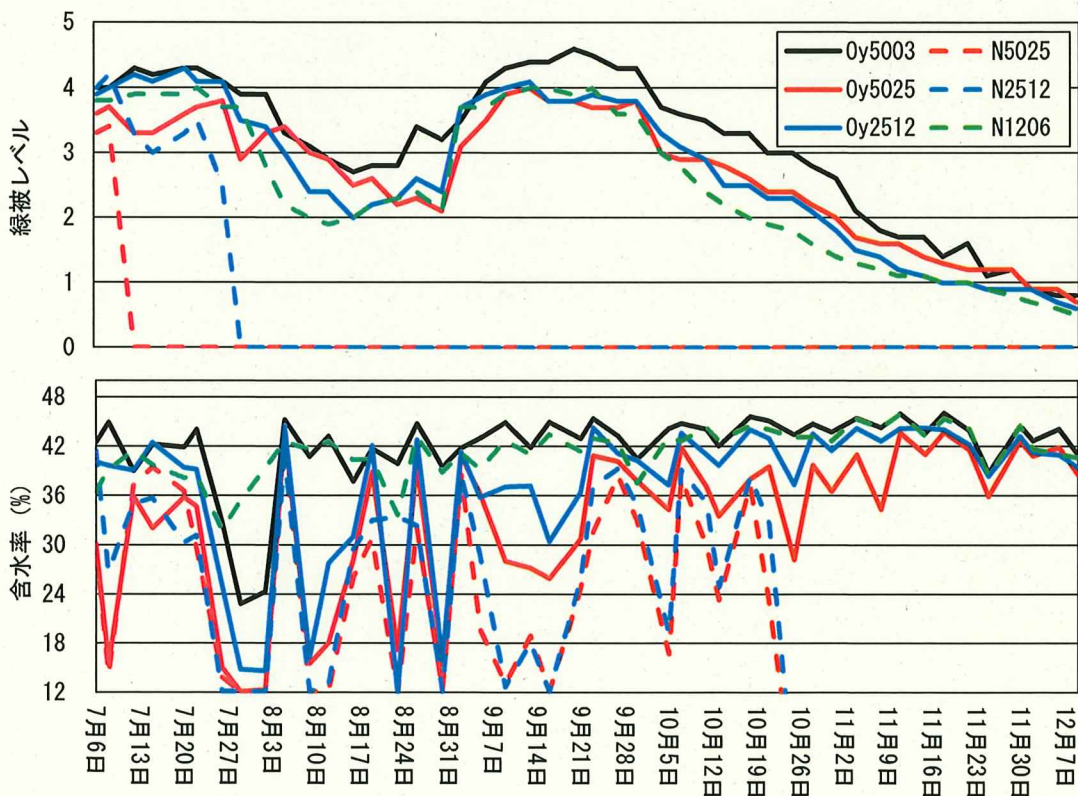


図12 緑被レベルと含水率の経時変化(水やりあり)

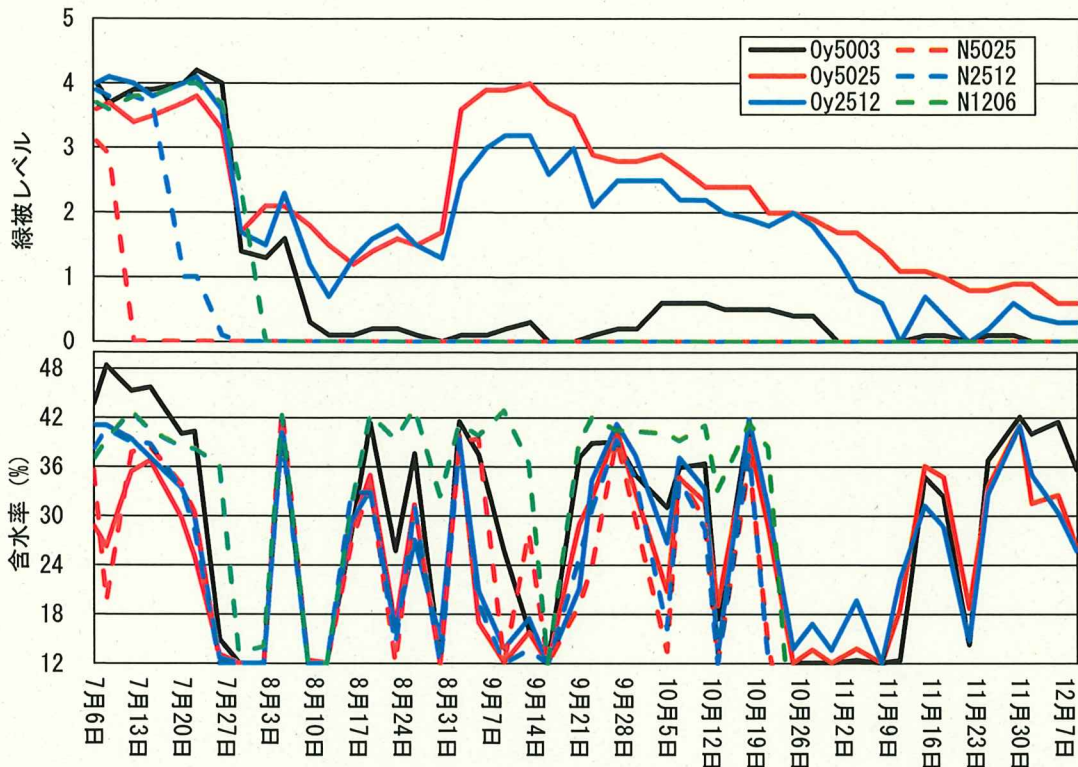


図 13 緑被レベルと含水率の経時変化(水やりなし)

植栽試験終了後、供試体を割裂した断面を観察して根の伸長深さを確認した。図 14 に水やりありの供試体の割裂断面を、図 15 に水やりなしの供試体の割裂断面を示す。供試体断面の観察結果より、水やりありの場合、緑被レベルが高い供試体の中では、小さい粒径の骨材を含む Oy5003、N1206 は上面から深さ約 7mm 以内の部分で細かい根がみられた。一方、骨材粒径が大きくなる供試体では空隙径が大きいため、Oy2512 では最大で約 30mm の深さまで、Oy5025 では約 80mm の深さまで根が伸長していた。また、水やりなしの場合、緑被レベルが低かった Oy5003、すべての NPoC では断面より短い根が数本しか観察されなかった。しかしながら、緑被レベルが高かった Oy5025、Oy2512 では根の伸長が深く、Oy2512 は最大で約 70mm、Oy5025 は厚さ 100mm の供試体を貫通した根がみられた。

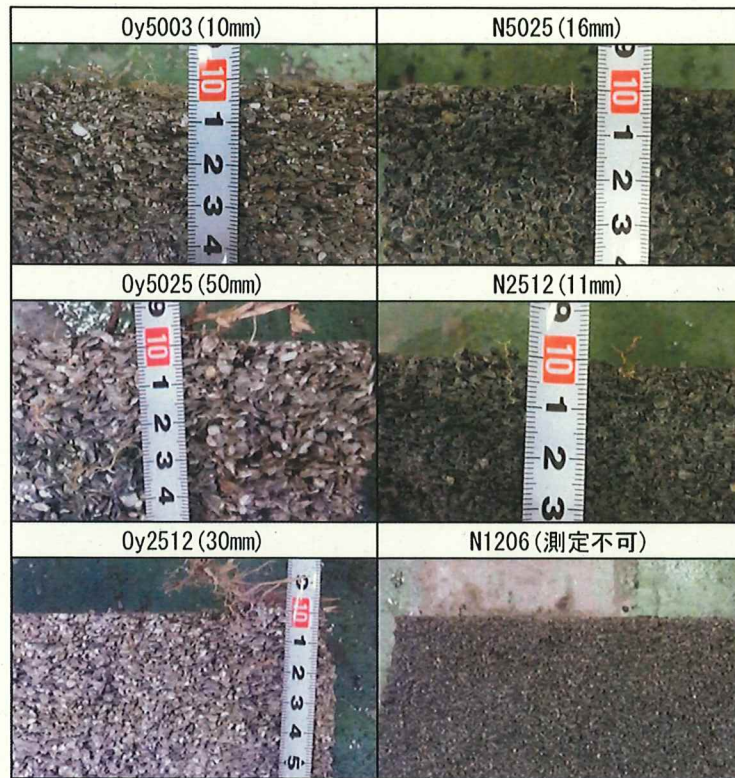


図 14 植栽試験終了後の割裂供試体断面(水やりあり)

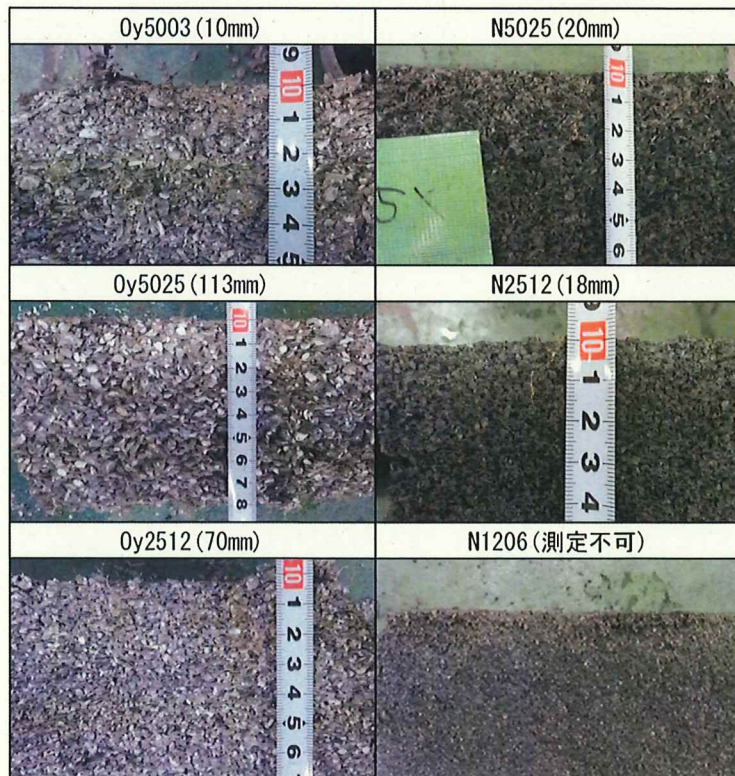


図 15 植栽試験終了後の割裂供試体断面(水やりなし)

以上の試験結果より、OyPoC の緑化性能は NPoC よりも高く、水やりを行わないのであれば粒径が大きい牡蠣殻骨材を用いた供試体が優れた結果を示していた。OyPoC 上での芝の育成では芝への水分供給が非常に重要である。水やりを行うと、小さい粒径の骨材を含む Oy5003 上でも芝は成長するが、これは供試体の保水性と揚水性の高さより、供試体表面上の含水率が高くなり、表面の水分だけで芝が成長できるからである。その結果、Oy5003 では根が供試体内に伸長していかない。しかし、水やりを行わないと表面部分に蓄積される水分量だけでは芝の成長には不十分であり、さらに Oy5003 は空隙径が小さくて根が伸長しにくいいため、夏季では水分不足のため芝が枯れてしまう。一方、使用骨材粒径が大きい Oy5025、Oy2512 では保水性や揚水性は Oy5003 より劣るが、根が伸長しやすいため供試体全体から水分が芝に供給でき、水やりを行わなくても芝が枯れるのを抑えることが可能である。構造物の緑化を想定した場合、水やりなどの手間はなるべく少ない方がよいいため、骨材粒径が大きい OyPoC の使用が望ましいと考えられる。

4. まとめ

以下に、本研究により得られた知見を示す。

- (1) 本研究の試験結果より、植生基盤には骨材粒径が大きい OyPoC が適しているといえ、OyPoC にグリーンインフラとしての適用性があると考えられる。
- (2) 2022年7月6日～12月9日の155日間の植栽試験より、水やりの有無に関わらず、単粒度で骨材粒径の大きい Oy5025、Oy2512 において、供試体内の空隙に根が深く伸長され、高い緑化性能を示した。
- (3) 透水試験、保水試験、揚水試験の結果より、OyPoC の粒度範囲が広がる、すなわち小さい粒径の骨材が多くなるほど含水量、揚水高さの値は大きく、透水係数は小さくなる傾向を示した。
- (4) 圧縮強度試験結果より、NPoC は骨材粒径によらず空隙率の低下に伴い、圧縮強度は増大する傾向を示したが、OyPoC は骨材強度が低いいため全ての供試体で 2N/mm^2 以下の全体的に低い値を示した。

参考文献

- 1) 国土交通省「グリーンインフラポータルサイト」：https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_tk_000015.html (2023.9.1 参照)
- 2) 広島県ホームページ「令和4年度広島かき生産出荷指針」：<https://www.pref.hiroshima.lg.jp> (2023.9.1 参照)
- 3) I. Horiguchi, Y. Mimura and P. J.M. Monteiro: Plant-growing performance of pervious concrete containing crushed oyster shell aggregate. Cleaner Materials, Vol.2, 2021