

論文 軽量クリンカーフリーポーラスコンクリートの植物生育能力の検討

阿部 珠子^{*1}・清原 千鶴²・エ ルドンオチル^{*3}・田中 章夫^{*4}

要旨：高炉スラグ微粉末（GGBS）を結合材とし、人工軽量粗骨材（LWA）を使用したクリンカーフリーポーラスコンクリート（CF-POC）の植物生育能力を検討した。GGBS のアルカリ刺激材にカルシウムサルホアルミネート系早強材を使用し、GGBS に対する置換率を 5%と設定した結果、屋上の押えコンクリートに要求される圧縮強度を満足した。植生試験の結果、植物の発芽能力および生育能力は土壌の pH と高い相関があることを確認した。CF-POC の炭酸化による植物生育能力への影響は、LWA に液肥をプレウェッティングすることで低減でき、同時に草丈の増大効果を得られることが判明した。

キーワード：ポーラスコンクリート、クリンカーフリー、緑化性能、人工軽量粗骨材、早強材

1. はじめに

持続可能な都市開発が求められる中、屋上緑化は都市環境の改善やヒートアイランド現象の緩和に寄与する手法として注目されている。東京都においても、特定の敷地面積を有する施設の新築や増築等に際し、一定基準以上の緑化を義務づける「東京における自然の保護と回復に関する条例」（第十四条）が制定されており、効果的な建築緑化技術への需要が高まっている。

ポーラスコンクリート（以下、POC）は屋上緑化に適した植栽基盤の一つである。POC は多孔質構造を有し、優れた透水性と保水性を備えており、植物の根の定着を可能にする。また、人工軽量粗骨材（以下、LWA）を用いた軽量 POC 植栽基盤の運用による、建物の冷暖房エネルギーの消費削減効果が報告されている¹⁾。さらに、POC の植物生育能力を向上させるためには、低アルカリ性の結合材を使用すること²⁾や、結合材の炭酸化が有効である³⁾。著者らはこれまでに、高炉スラグ微粉末（以下、GGBS）を使用したクリンカーフリーポーラスコンクリート（以下、CF-POC）が、従来の POC と比較してアルカリ溶出量が低下することを報告している⁴⁾。一方で、CF-POC の強度発現性は従来の POC より低く、脱型材齢の遅延が課題である。

本研究では、水和反応によりエトリンガイトを生成するカルシウムサルホアルミネート系早強材をアルカリ刺激材として使用し、GGBS の反応性の向上を図った。初めに、屋上緑化基盤としての使用を想定し設計した CF-POC の力学的性能を検討した。次にコマツナと芝草の植生試験を行い、結合材種類および養生方法が発芽性能、生育性能、散水間隔に与える影響を検討し、CF-POC の植物生育能力を考察した。

2. 試験概要

2.1 使用材料

表-1 に本研究で使用した材料の物性値を、表-2 に結合材の化学組成を示す。CF-POC の植物生育能力の向上を目的に、市販の栄養剤（液肥）を用い、LWA にプレウェッティングを施した（図-1）。希釈倍率は 40 倍（庭植え植物に対する 1 か月の推奨濃度の約 3 倍）とした。GGBS は石膏を添加していないタイプを用い、必要に応じて無水石膏（以下、Ca）を添加した。また、GGBS のアルカリ刺激材として既往研究⁵⁾と同一のカルシウムサルホアルミネート系早強材（以下、EA）を使用した。

表-1 使用材料

項目	記号	性能
人工軽量粗骨材	LWA	粗粒率: 6.35 絶乾密度: 1.31g/cm ³ 吸水率: 27.0% 実積率: 60.4%
栄養剤	—	多量必須元素比: N:P:K=6:10:5
高性能 AE 減水剤 (I 種)	Ad	ポリカルボン酸系化合物 リグニンスルホン酸塩

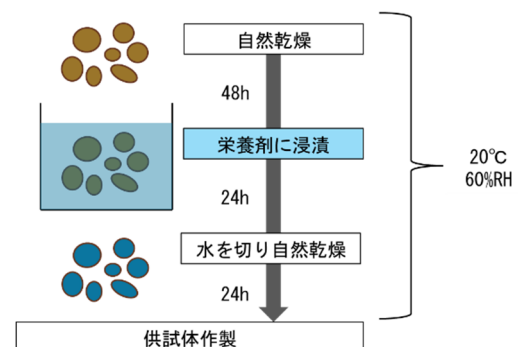


図-1 栄養剤の浸漬方法

*1 東京理科大学大学院 工学研究科建築学専攻（学生会員）

*2 東京理科大学 研究推進機構総合研究院プロジェクト研究員 工博（正会員）

*3 静岡理工科大学 理工学部建築学科講師 工博（正会員）（元東京理科大学工学部建築学科助教）

*4 日本工業大学 建築学部建築学科准教授 工博（正会員）

表-2 結合材の化学組成

	記号	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	構成比(%)						
				SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	R ₂ O
普通ポルトランドセメント	OPC	3.16	3340	20.65	5.06	3.08	64.19	0.98	1.98	0.54
高炉スラグ微粉末	GGBS	2.91	4160	34.57	14.59	0.30	44.03	5.39	0.01	0.47
早強材	EA	2.52	2950	1.99	1.71	0.44	50.39	0.71	21.78	1.78

2.2 調合

本研究におけるペースト供試体の調合を表-3 に、POC 供試体の調合を表-4 に示す。ペーストの水結合材比 W/B を 30%とし、POC 供試体の設計空隙率を 25%に設定した。なお、BB については市販の高炉セメント B 種の使用を想定し、OPC の 40%を GGBS で置換することで、類似の調合を行った。

2.3 供試体作製方法

表-5 に供試体寸法を示す。練混ぜ方法は、強制 1 軸パン型ミキサ（容量 100L）を使用し、ペースト先練り方法を採用した。練混ぜは、初めに粉体をハンドミキサで 15 秒間混ぜ、水と混和剤を投入し、300 秒間混ぜた。ペーストフロー試験を行い、目標フロー値（190±15mm）が得られたことを確認した後、パン型ミキサに粗骨材とペーストを入れ、40 秒ごとに掻き落とし、計 120 秒間混ぜた。ペーストが粗骨材全体を覆っていることを確認し、練混ぜ完了とした。POC 供試体は、空隙率 25%とするために、1 体当たりの打込み質量を調合から算出し、すべて 2 層打ちにより行った。締固めは、突き棒を使用し、層ごとに棒突きを行った後、表層をコテにより仕上げた。ペーストの垂れを防ぐために、ジグギングを控え、設計空隙率±5%を許容範囲として作製した。ペースト供試体は、2 層打ちとし、各層ジグギングにより締固め、表層をコテにより仕上げた。

2.4 試験項目

(1) ペーストフロー試験および空隙率測定

ペーストフロー試験方法は JIS R 5201 に準拠した。空隙率測定方法は JCI-SPO2-1 に準拠し、質量法により算出した。

(2) 圧縮強度試験

ペースト供試体および POC 供試体の圧縮強度試験方法は JIS A 1108 に準拠した。供試体は材齢 1 日まで恒温恒湿室（温度 20℃、湿度 60%RH）内で型枠内養生し、脱型後にラップで被覆し、恒温恒湿室内で材齢 28 日まで封緘養生を行った。供試体寸法はペースト供試体を φ50×100mm、POC 供試体を φ100×200mm とした。また、試験前にペースト供試体の端面を研磨した。POC 供試体は止水セメントによるキャッピングを施した。

(3) アルカリ溶出試験

既往研究²⁾を参考に、20℃の上水道水 3L に材齢 28 日

表-3 ペースト調合表

記号	水結合材比 W/B (%)	Ca 置換率 (%)	EA 置換率 (%)	Ad (B×%)
CF	30	0	3.5	0
	30	1.5	3.5	0
	30	1.5	5	0.055
	30	1.5	6.5	0.071
記号	水結合材比 W/B (%)	Ca 置換率 (%)	OPC:GGBS	Ad (B×%)
BB	30	1.5	60:40	0
N	30	-	100:0	0

表-4 POC 調合表

記号	栄養剤	単位量 (kg/m ³)						Ad (B×%)
		W	OPC	GGBS	Ca	EA	LG	
CF-A	×	68	0	212	3.2	11	989	0.055
CF-B	○	68	0	212	3.2	11	989	0.055
BB	×	70	140	92	1.4	0	989	0
N	×	71	237	0	0	0	989	0

表-5 供試体寸法

寸法・形状	用途
Φ50×100mm 円柱型	ペースト圧縮強度試験 ペースト植生試験
Φ100×200mm 円柱型	POC 圧縮強度試験 アルカリ溶出試験
100×100×150mm 角柱型	POC 植生試験

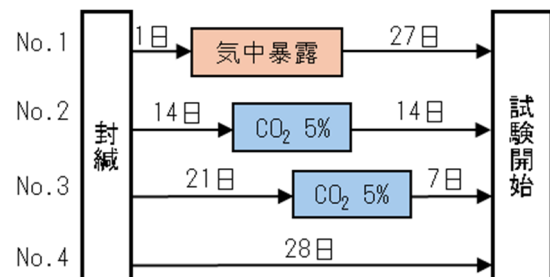


図-2 養生方法

の円柱供試体を浸漬し、市販の pH メーターを用いて浸漬水の水素イオン濃度（pH 値）を測定した。本試験では CF-POC の実運用までの期間の短縮を意図し、浸漬 7 日後の pH 値を測定した。また、適切な脱アルカリ期間を検討するために、図-2 に示す 4 種類の養生方法を検討した。No.2 および No.3 は 20℃、60%RH、CO₂ 濃度 5% に調整されたチャンバー内で促進炭酸カルシウム養生（以下、炭酸カルシウム養生）を行った。

(4) ペースト植生試験

表-3 における CF (EA 置換率 5%), BB および N のペースト供試体の粉砕物を用いた植生試験を行った。既往研究³⁾を参考に、ペーストを練混ぜ後に $\phi 50 \times 100\text{mm}$ の円柱型枠に打ち込み、図-2 の No.3 および No.4 の養生を行い試験に供した。No.3 は炭酸化前に、No.4 は混合前に粒径を 1mm 以下に調整し、市販の黒土と質量比 30:70 で混合した。植生試験は「植物に対する害に関する栽培試験の方法 (昭和 59 年農蚕第 1943 号農林水産省農蚕園芸局長通知)」に準拠した。混合土壌を内径 11.3cm、高さ 6.5cm の鉢に約 500mL 充填し、コマツナ (発芽率 90% 以上) を 1 鉢あたり 20 粒、等間隔となるようマス目状にピンセットで播種した。試験期間中は定期的に、上水道水による散水を行った。

(5) 混合土壌の化学分析

試験前の混合土壌 10g を脱イオン水に浸漬し、1 日静置後に浸漬液の pH をガラス電極法で、電気伝導度 (EC) を交流 2 極法で測定した。

(6) POC 植生試験

既往研究³⁾を参考に以下の植生試験を行った。図-3 に示すように、角柱型に作製した POC を、図-2 の No.3 および No.4 の養生を行い試験に供した。黒土を同量の上水道水でスラリー化し、手で振動を加えながら空隙体積の 55% を充填し、バーク系基材で 1cm 覆土した。ケンタッキープルーグラス、ペレニアルライグラス、ファインフェスクを混合した寒地型芝草 (以下、西洋芝) の種子 (発芽率 75% 以上) を 600mg 播き、2 か月間生育状況を観察した。播種後 28 日目までは 2 日おきに、以降 56 日目まで 4 日おきに上水道水による散水を行った。散水量は 1 回あたり 200mL とした。

(7) ペーストの空隙構造の分析

GGBS を高含有したセメント硬化体は $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 量が少なく、炭酸化後の CaCO_3 による細孔の充填効果が小さいため、細孔構造の粗大化が指摘されている⁶⁾。CF ペーストにおける細孔構造を確認するため、簡易的な水蒸気吸着試験を行った。湿度調整用の塩類は $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、NaCl を選択し、それぞれの塩飽和水溶液によって相対湿度 33, 53, 75% に調整したデシケーターに、105℃ の電気炉で 48 時間乾燥させた試料 5g を静置し、24 時間ごとの質量変化が 3 回連続で 0.1% となる際の質量含水率 u を測定した。なお、サンプルサイズは $n=3$ とした。

$$u = \frac{m - m_0}{m_0} \times 100 \quad (1)$$

ここに、 u : 質量含水率(%), m : 吸着終了時の試料の質量(g), m_0 : 基準乾燥状態での試料の質量(g)

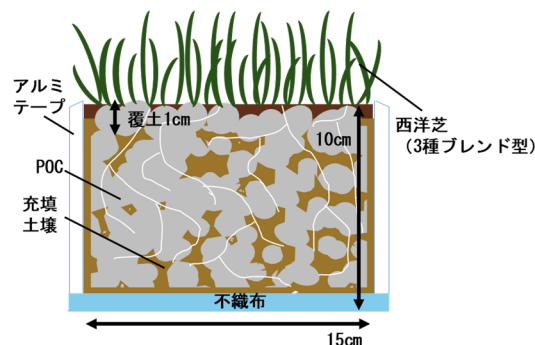


図-3 POC 植生試験の概要

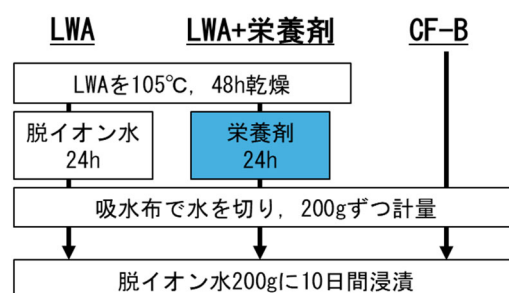


図-4 滲出効果の検証

(8) 栄養剤の滲出性の検証

プレウェッティングした栄養剤の滲出を確認するため、図-4 に示す手順で LWA を脱イオン水に 10 日間浸漬し、ろ過した浸漬液における、栄養剤に高含有されているリンの滲出量を反射式光度計で測定した。

3. 結果および考察

3.1 力学的特性

(1) ペースト圧縮強度

図-5 に EA の置換率を 3.5, 5.0, 6.5% とした場合のペースト供試体の圧縮強度 (3 体のデータの平均値) を示す。著者らは GGBS のアルカリ刺激材に炭酸ナトリウムを用いた際、POC 河川護岸適用可能レベルの強度発現性能があることを指摘している⁷⁾。このときのペーストの圧縮強度は約 40N/mm² であり、これを満たす EA 置換率 5.0% を以降の試験で採用する。また、図-6 に材齢 28 日におけるペースト供試体の圧縮強度 (3 体のデータの平均値) を示す。同一水結合材比 (30%) で比較すると、BB および N には及ばないものの、他のアルカリ刺激材⁸⁾⁹⁾を使用したクリンカーフリーペーストと比較して高い強度発現性能を示した。

(2) POC 圧縮強度

図-7 に POC 供試体の圧縮強度 (3 体のデータの平均値) を示す。図によれば、CF-A および CF-B の圧縮強度は同程度であった。使用した栄養剤はリンの構成比が高い製品であり (表-1), 栄養剤中の PO_4^{3-} と GGBS の Ca^{2+}

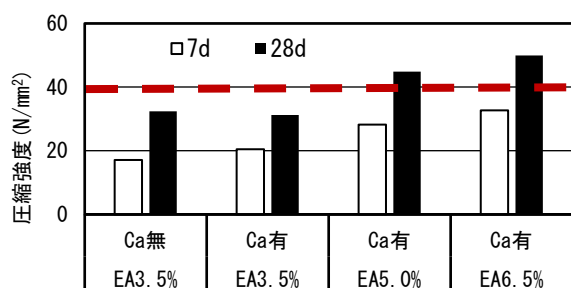


図-5 EA 置換率の検討

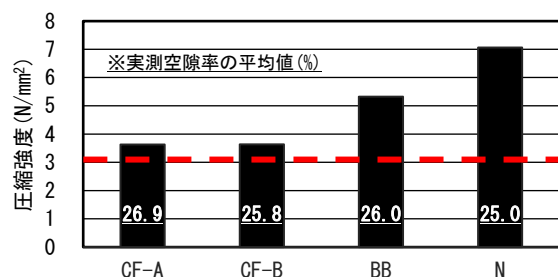


図-7 POC 圧縮強度（設計空隙率 25%）

が式（2）の反応を示し、難溶性の $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ が粗骨材表面に析出することでペーストとの結合を阻害する可能性が指摘されるが、図-7 に示すように設計空隙率 25%において栄養剤添加の有無が CF-POC の強度発現に与える影響は小さいと推測される。また、アルカリ刺激材に EA を使用することで、屋上の押えコンクリートの役割を担うために要求される強度 3N/mm^2 を満足した¹⁰⁾。



3.2 アルカリ溶出性

図-8 にアルカリ溶出試験結果を示す。植物生育における土壌の pH の推奨値は 8.0、上限値は 9.5 とされており¹¹⁾、気中暴露および炭酸化養生を行った CF-A、CF-B の浸漬水の pH はこれを満足した。また、CF-POC の結合材に GGBS と EA を使用した場合、気中暴露を 28 日間行うことで CO_2 濃度 5% の促進炭酸化 7 日間と同程度の pH 低減効果が発揮されることが判明した。以降の植生試験では、養生時の温度むらを抑えるため、促進炭酸化 7 日による脱アルカリ方法を選択した。

3.3 ペースト植生試験

(1) 発芽性能

図-9 に播種後 7、14、28 日後のコマツナの発芽率（播種数 20 に対する発芽本数の割合）を示す。BB および N に関して、ペーストを炭酸化した方が高い発芽率を得た。高アルカリ性の土壌ほど発芽に悪影響を及ぼす傾向は、既往研究³⁾と一致した。CF は封緘養生した土壌の初期の発芽率が低い傾向にあった。原因として土壌溶液の塩類濃度の増加に伴う浸透圧の上昇により、コマツナの根の水分吸収が阻害された可能性があるが、14 日以降向上していることから、一時的なものと考えられる。

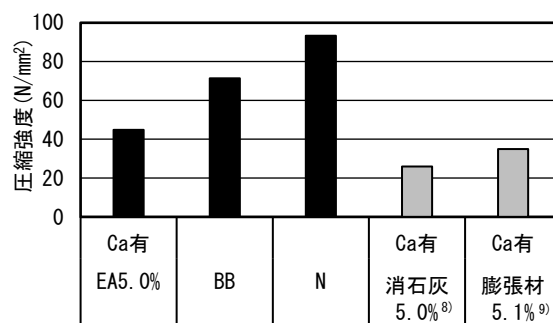


図-6 ペースト圧縮強度（材齢 28 日、W/B：30%）

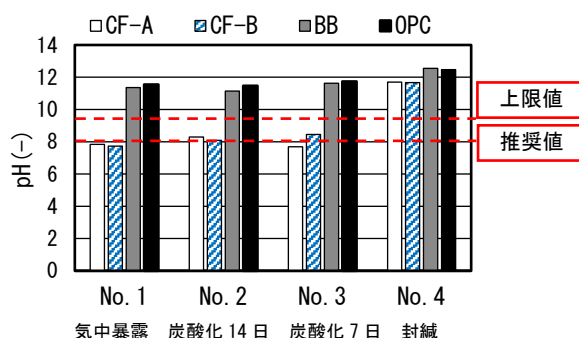


図-8 アルカリ溶出試験結果

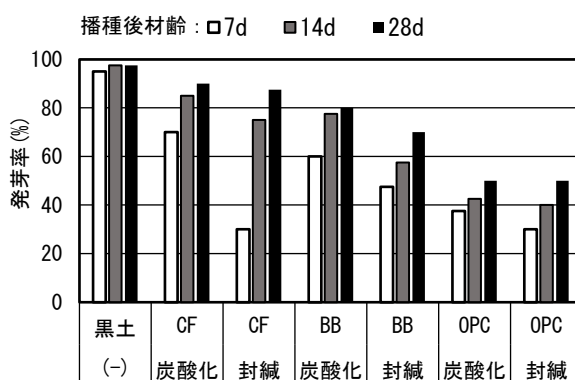


図-9 コマツナの発芽率

(2) 混合土壌の化学分析

図-10 に播種 14 日後のコマツナの発芽率と試験前の混合土壌の pH の関係を示す。発芽率と混合土壌の pH は高い相関関係にあった。コマツナの生育最適 pH は 5.5～6.5 であり、本試験により発芽過程においても pH が低いほど有利であることが確認された。続いて、図-11 に播種 14 日後のコマツナの発芽率と試験前の混合土壌の電気伝導度 EC の関係を示す。各試験体の処理方法は同一であり、散水前の土壌含水率は同一と仮定すると EC は土壌中の塩類濃度の目安となり、高いほど養分量が多い傾向を示す。葉・根菜類の植付け時の適正な EC は 0.2～0.6 dS/m とされ¹²⁾、特に CF の混合土壌の EC は過大といえる。これは無水石膏および EA から供給される SO_4^{2-} の電荷が高いため、EC を押し上げたと考えられる。

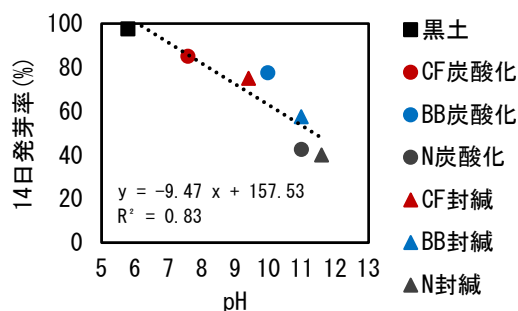


図-10 発芽率と土壌の pH の関係

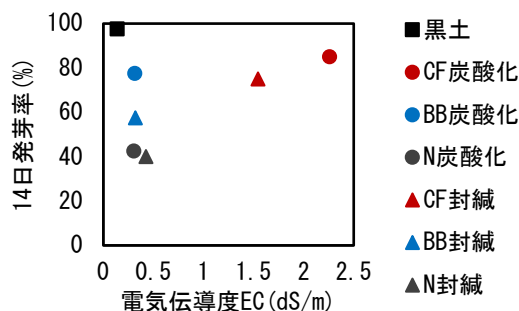


図-11 発芽率と土壌の EC の関係

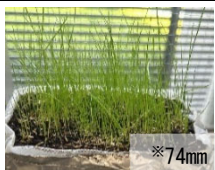
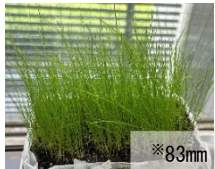
	CF-A(栄養剤無)	CF-B(栄養剤有)	BB	N
播種後 28 日 (封緘)				
播種後 28 日 (炭酸化)				
播種後 56 日 (炭酸化)				

図-12 西洋芝の生育状況の比較

※5本の平均草丈

3.4 POC 植生試験

(1) 西洋芝の生育状況

図-12 に西洋芝の生育状況の比較を示す。播種後 28 日の封緘養生による供試体を比較すると、草丈は CF-B、CF-A、BB、N の順となり、栄養剤が生育に寄与し、かつペーストの pH の低減により生育が向上した。播種後 56 日において、BB および N は発育不良により草丈の計測が不可能であった。したがって、クリンカーフリー結合材の使用は西洋芝の植生を向上させることが示唆された。

一方、CF-A の養生方法の違いを比較すると、炭酸化養生を行った CF-A の生育量が減少した。図-13 に示す CF の水蒸気吸着結果より、炭酸化による吸着量の低下が認められ、EA をアルカリ刺激材に使用した際も、既往研究⁹⁾と同様にペーストの細孔構造の粗大化が推測される。GGBS の炭酸化による細孔構造の粗大化は、内部の水分逸散を増加させる⁹⁾。このことから、炭酸化 CF-A の植生低下に影響を与えたと考える。文献¹³⁾においては、Na⁺を高含有するアルカリ刺激材を使用した GGBS 硬化体で、炭酸化により溶解度の高い Na の炭酸塩が生じることが

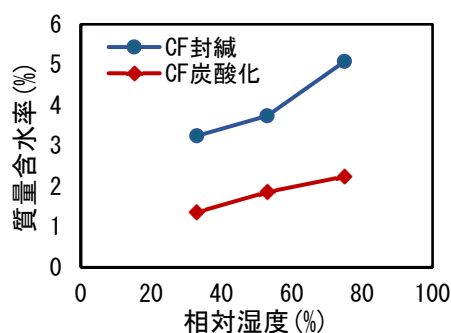


図-13 質量含水率と相対湿度の関係

報告されており、また文献¹⁴⁾においては、6 価クロムを固定しているモノサルフェートが炭酸化により分解されることが報告されている。文献¹⁵⁾によると Na⁺や重金属イオンの過剰な存在は植物の生育を阻害するため、これらも炭酸化 CF-A の植生低下の要因として挙げられる。しかしながら本研究ではイオンや 6 価クロムの溶出の測定を行っておらず、また、水分逸散の増加も細孔内のイオン移動を促進する可能性もあるため、溶出の可能性と

そのメカニズムに関する考察を今後進めてゆく必要があると考える。なお、CF-Bでは植生に影響がみられなかったが、栄養剤に含まれるN、P、K等のイオンが拮抗作用を示し、生育阻害が抑制されたと考えられる。

散水間隔を拡大した結果、BBおよびNは枯れてしまったが、CF-A、CF-Bは半数以上が残存した。一般に、強アルカリ性環境下では、土壌粒子の表面が負に帯電しやすくなり、粒子間の反発力が強まることで団粒構造が崩れ、細孔が粗大化する。この結果、土壌の保水性は低下する。CFは他の供試体より土壌のpHが低いため、保水性の低下が抑制されたと推測される。

(2) 栄養剤の滲出性の検証

表-6にリンの検出結果を示す。LWAから検出されていないリンがCF-Bから検出され、栄養剤は充填土壌に滲出したことが示唆される。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) GGBSのアルカリ刺激材にEAを使用し、GGBSに対する置換率を5.0%と設定した結果、空隙率25%のCF-POCは屋上の押えコンクリートに要求される圧縮強度3N/mm²を満足した。
- 2) コマツナによる植生試験の結果、CFペースト混合土壌の発芽率が最も高く、土壌のpHが発芽率に及ぼす影響は大きいといえる。
- 3) 西洋芝による植生試験の結果、封緘養生の供試体の生育量はCF-B>CF-A>BB>Nの順であり、栄養剤の滲出性やCF-POCの生体親和性の高さが示された。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、デンカ株式会社より早強材をご提供いただいた。また、本研究費の一部は2022年度科学研究費若手研究（代表者：エルドンオチル、課題番号：22K14366）によった。付記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 唐沢明彦，土田保：建築物の熱環境に及ぼす軽量ポーラスコンクリート屋上緑化システムの効果，日本緑化工学会誌，Vol.27，No.1，pp.205-208，2001.8
- 2) 山口信，武田浩二，池崎智美，村上聖：3成分系エコバインダーを適用したポーラスコンクリートの緑化基盤材としての用途を想定した基礎物性，セメント・コンクリート論文集，Vol.66，No.1，pp.684-691，2013.2
- 3) 横関康祐，取違剛，高山晴夫，樋口隆行：ポーラスコンクリートの植物生育能力向上に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.1405-

表-6 リン検出量の比較

P (mg/L)		
LWA	LWA+栄養剤	CF-B
不検出	28.69	4.89

- 1410，2013.7
- 4) 阿部珠子ほか：高炉スラグ微粉末を使用したクリンカーフリーポーラスコンクリートの品質管理方法の検討，日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），pp.511-512，2024.8
- 5) 田中館悠登，前田拓海，樋口隆行，荒木昭俊：高炉スラグ微粉末を使用したモルタルの強度発現性に及ぼすカルシウムサルホアルミネート系早強材の影響，セメント・コンクリート論文集，Vol.77，No.1，pp.206-212，2024.3
- 6) 宮原茂禎，荻野正貴，大脇英司，坂井悦郎：高炉スラグ微粉末を使用したペーストの炭酸化による変質挙動，セメント・コンクリート論文集，Vol.74，No.1，pp.59-66，2021.3
- 7) 阿部珠子ほか：クリンカーフリーポーラスコンクリートの力学特性と透水性能に関する研究，日本建築学会関東支部研究報告集，Vol.94，pp.61-64，2024.3
- 8) 江詩唯，今本啓一，清原千鶴，徐建恒：全量産業副産物としたクリンカーフリーコンクリートの開発，コンクリート工学年次論文集，Vol.40，No.1，pp.69-74，2018.7
- 9) チンジョンイ，今本啓一，清原千鶴：全量高炉スラグ系副産物としたクリンカーフリーコンクリートの基本物性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.44，No.1，pp.1174-1179，2022.7
- 10) 石川嘉崇，堀口剛，梅干野晃：植栽型ポーラスコンクリートの屋上緑化への応用に関する研究，ポーラスコンクリートの設計・施工法と最近の適用例に関するシンポジウム 委員会中間報告書・論文集，pp.165-168，2002.5
- 11) 興水肇：建築空間の緑化手法，彰国社，1985.10
- 12) JA 全農肥料農薬部：土壌診断なるほどガイド，JA全農，2008.2
- 13) 山崎雄斗，金志訓，濱幸雄，角谷慧祐：結合材およびアルカリ刺激材の種類によるジオポリマーの炭酸化に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.42，No.1，pp.1804-1809，2020.7
- 14) 櫻井園子，兼松学，野口貴文，吉澤千秋：高炉スラグ微粉末の六価クロム溶出抑制効果の検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，pp.52-57，2014.7
- 15) 山崎耕宇ほか：植物栄養・肥料学，朝倉書店，1993.3