

論文 低炭素型ポーラスコンクリートの製造方法および基礎特性に関する実験的研究

坂本 英輔*1・深澤 巴菜*2・竹田 宣典*3

要旨: 本研究では、カーボンニュートラル社会の実現を目指す取組みの一手法として、CO₂排出量の少ない材料 (CCU 粉体および高炉スラグ微粉末) を使用した低炭素型ポーラスコンクリート (以下、POC) を製造し、その基礎特性の把握を試みた。その結果、低炭素型 POC も、ペーストにセメントのみを用いた普通 POC と同じ製造方法で、設計空隙率どおりの空隙率を有する供試体を作製できることや、低炭素型 POC の透水係数は普通 POC と同程度であることなどが明らかになった。また、圧縮強度や透水係数の試験結果と CO₂ 排出量の計算結果などから、社会実装可能な低炭素型 POC の製造が可能であることが示唆された。

キーワード: ポーラスコンクリート, カーボンニュートラル, CCU 材料, 高炉スラグ微粉末, CO₂ 排出量

1. はじめに

近年、世界的に深刻な問題となっているのが、地球温暖化による気候変動である。地球温暖化に影響を及ぼす温室効果ガスの中でも特に、CO₂排出量の低減は、世界規模での共通認識となっている。日本政府は、2020年10月に2050年までに温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする、すなわちカーボンニュートラルによる脱炭素社会の実現を目指すことを宣言している。こうした中、コンクリート分野においては、コンクリート製造に関わるCO₂排出量の約90%がセメントの製造に起因していると言われており¹⁾、セメント量を大幅に削減した低炭素型のコンクリートの開発やCO₂を吸収・固定したCCU (Carbon dioxide Capture and Utilization) 材料の活用について検討が行われている^{例(例えば)2)}。

ポーラスコンクリート (以下、POC) は通常のコンクリートとは異なり、内部に多くの連続空隙を持っており、高い透水、保水および揚水性能を有している。そのような POC は、透水舗装や緑化基盤などといった環境負荷の低減や生物共生などのための用途にとどまらず、透水・貯水性能を活用した防災対策としての役割も期待されている³⁾。POC は多くの空隙を有しているが、ペーストを高強度化することで、通常のコンクリートと同程度の強度を実現している。そのため、POC では、単位容積当たりのセメント使用量が多く、通常のコンクリートに比べてCO₂排出量が多くなる場合がある。最近では、クリーンカーフリーの POC についての研究も行われている⁴⁾。

そこで本研究では、カーボンニュートラル社会の実現を目指す取組みの一手法として、CO₂ 排出量の少ない材料を使用した低炭素型 POC を製造し、その基礎特性の把握を試みた。

表-1 CCU 粉体の品質 (一例)

項目	試験値	
密度 (g/cm ³)	2.60	
比表面積 (cm ² /g)	6,550	
化学成分 (%)	二酸化ケイ素 SiO ₂	0.62
	酸化アルミニウム Al ₂ O ₃	0.28
	酸化第二鉄 Fe ₂ O ₃	0.15
	炭酸カルシウム CaCO ₃	96.4
	酸化マグネシウム MgO	0.26

表-2 使用材料

材料	種類
セメント	普通ポルトランドセメント, 比表面積: 3,420cm ² /g 密度: 3.16g/cm ³ , CO ₂ 排出量: 807kg-CO ₂ /t
水	上水道水, CO ₂ 排出量: 0.198kg-CO ₂ /m ³
高炉スラグ微粉末	比表面積: 4,020cm ² /g, 密度: 2.91g/cm ³ CO ₂ 排出量: 40.21kg-CO ₂ /t, 石膏無添加
CCU粉体	軽質炭酸カルシウム, 比表面積: 6,550cm ² /g 密度: 2.60g/cm ³ , CO ₂ 排出量: 50kg-CO ₂ /t, CO ₂ 固定量: 440kg-CO ₂ /t
CaCO ₃ (工業製品)	軽質炭酸カルシウム, 比表面積: 8,700cm ² /g 密度: 2.71g/cm ³
粗骨材 (碎石)	粒径: 5~20mm, 表乾密度: 2.70g/cm ³ , 吸水率: 0.50% 実積率: 62.0%, CO ₂ 排出量: 7.09kg-CO ₂ /t
化学混和剤	高性能減水剤 (ポリカルボン酸系) CO ₂ 排出量: 225kg-CO ₂ /t

握を試みた。

2. 実験概要

本研究では、CO₂ 排出量の少ない材料として、遠心成形品の製造工場において排出されるスラッジ水に、同工場における蒸気養生の際に発生する排気ガスを吹き込んで生成させた軽質炭酸カルシウム (以下、CCU 粉体) および高炉スラグ微粉末 (以下、BFS) を、POC のペース

*1 広島工業大学 工学部建築工学科教授 博士 (工学) (正会員)

*2 広島工業大学 工学部建築工科学部生

*3 広島工業大学 工学部環境土木工学科教授 博士 (工学) (正会員)

表-3 ペーストの調合表

(a) シリーズ I (CCU 粉体を使用)

No.	調合 記号	単位質量(kg/m ³)				SP (P×%)	FL (mm)	CO ₂ 排出量 (kg/m ³)
		W	C	BFS	E			
1E	C100B0E0	441	1765	0	0	0.13	159	1425
2E	C75B0E25	428	1285	0	428	0.42	155	872
3E	C75B25E0	436	1307	436	0	0.13	157	1074
4E	C50B0E50	416	833	0	833	0.77	150	350
5E	C50B25E25	423	846	423	423	0.39	157	537
6E	C50B50E0	430	860	860	0	0.15	163	731
7E	C25B0E75	405	405	0	1214	1.30	166	-142
8E	C25B25E50	411	411	411	822	0.82	161	31
9E	C25B50E25	418	418	836	418	0.42	165	210
10E	C25B75E0	425	425	1274	0	0.17	167	396
11E	C0B0E100	394	0	0	1576	2.30	165	-606
12E	C0B25E75	400	0	400	1200	1.15	152	-448
13E	C0B50E50	406	0	813	813	0.81	160	-282
14E	C0B75E25	413	0	1238	413	0.44	163	-110
15E	C0B100E0	419	0	1678	0	0.10	155	68

[註]W:水, C:セメント, BFS:高炉スラグ微粉末, E:CCU粉体, SP:高性能減水剤,
P:粉体(=C+BFS+E), FL:フロー値, CO₂排出量:マイナスは固定量を示す

(b) シリーズ II (CaCO₃を使用)

No.	調合 記号	単位質量(kg/m ³)				SP (P×%)	FL (mm)
		W	C	BFS	L		
1L	C100B0L0	441	1765	0	0	0.16	154
2L	C75B0L25	431	1294	0	431	0.16	156
3L	C75B25L0	436	1308	436	0	0.18	165
4L	C50B0L50	422	844	0	844	0.18	152
5L	C50B25L25	426	853	426	426	0.19	165
6L	C50B50L0	431	862	862	0	0.16	164
7L	C25B0L75	413	413	0	1238	0.22	157
8L	C25B25L50	417	417	417	834	0.16	153
9L	C25B50L25	421	421	843	421	0.13	157
10L	C25B75L0	426	426	1278	0	0.10	155
11L	C0B0L100	404	0	0	1615	0.16	163
12L	C0B25L75	408	0	408	1224	0.13	153
13L	C0B50L50	412	0	825	825	0.10	160
14L	C0B75L25	417	0	1250	417	0.05	151
15L	C0B100L0	421	0	1685	0	0.10	166

[註]W:水, C:セメント, BFS:高炉スラグ微粉末, L:工業製CaCO₃, SP:高性能減水剤, P:粉体(=C+BFS+L), FL:フロー値

トの構成材料として使用した低炭素型 POC について検討を行った。CCU 粉体は既に実用化(表-1 参照)されており、CO₂固定量は 440kg-CO₂/t であるが、製造段階に約 50kg-CO₂/t の CO₂ 排出があるため、正味の CO₂ 固定量は 390kg-CO₂/t と試算されている⁵⁾。表-2 に本研究の使用材料を示す。同表の CO₂ 排出量は、参考文献 6) の値を用いており、製造時に排出される CO₂ のみを対象としている。BFS の CO₂ 排出量は、40.21kg-CO₂/t であるが、セメントの製造時の CO₂ 排出量 807kg-CO₂/t と比較すると、CO₂ 排出量が少ないことが分かる。なお、今回使用した BFS は石膏無添加のものである。

本研究の流れとしては、まず、POC のペーストの調合に関する検討を行い、その検討結果から代表的なペーストの調合を決定した。次に、それらの調合のペーストで POC を作製し、セメントペーストを用いた POC (以下、普通 POC) と低炭素型 POC について、圧縮強度や透水係数などを比較し、低炭素型 POC の社会実装の可能性を検討した。

3. ペーストの調合に関する検討

POC の圧縮強度は、同じ空隙率であれば、ペースト強度が高いほど高くなる。社会実装できる低炭素型 POC の開発を目指すためには、施工性を有し、できるだけ圧縮強度が高く CO₂ 排出量が少ないペーストの調合が望ましい。そこで、まず、セメント、BFS および CCU 粉体の質量割合を変化させた 15 調合のペーストについて、標準養生 28 日・91 日および封緘養生 91 日における圧縮強度の確認を行った。次に、CCU 粉体と同じ軽質炭酸カルシウムであるが工業製品である CaCO₃ (以下、CaCO₃) を用いて上記と同様の検討を行った。本論文では、ペーストの調合に関する検討において、CCU 粉体を用いた検

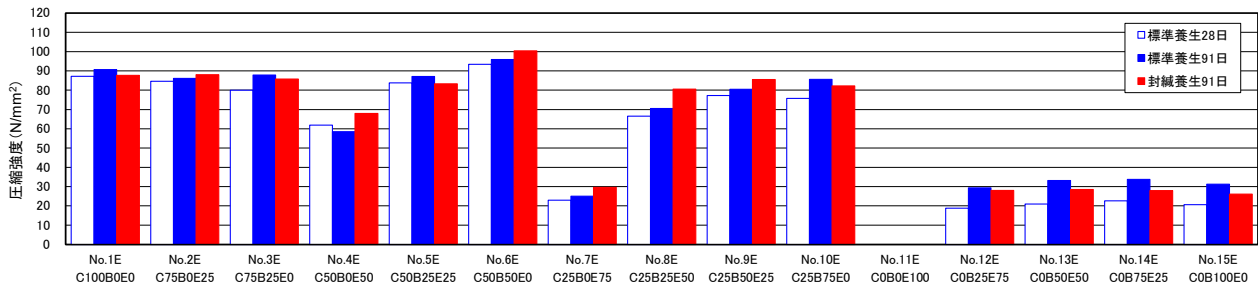
討をシリーズ I, CaCO₃ を用いた検討をシリーズ II とし、各シリーズにおけるベース調合 No.1 との比較からおおよその傾向の把握を試みた。

3.1 調合表

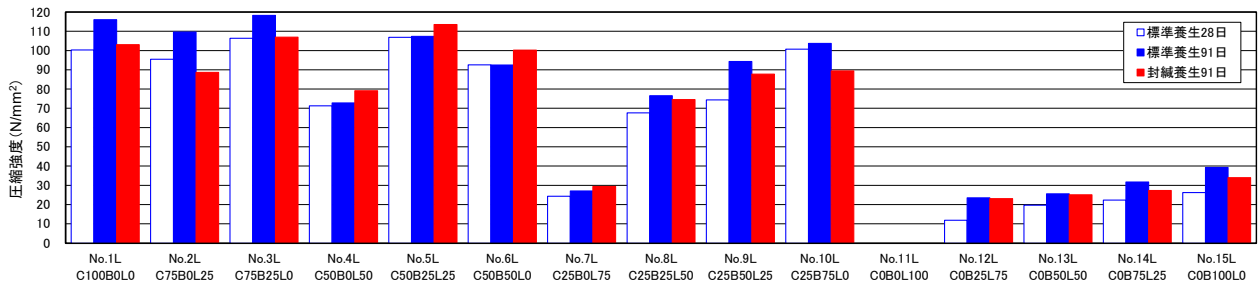
表-3 にペーストの調合表を示す。同表には、化学混和剤の添加率およびフロー値を併記しており、表-3 (a) については CO₂ 排出量も併記している。なお、CO₂ 排出量がマイナス表示の場合は固定量を示している。シリーズ I とシリーズ II とともに、水粉体比は 25% とし、POC 製造時の施工性を考慮して、ペーストのフロー値の許容値を 160±10mm とするように化学混和剤の添加率で調整した。なお、化学混和剤の添加率は、事前に行った予備実験から決定した。

3.2 実験方法

実験方法は、シリーズ I とシリーズ II とともに同様である。ペーストの練混ぜには、4L のモルタルミキサーを用いた。練混ぜ手順は、まず、粉体をさじで 30 秒間よくかき混ぜ、次に、あらかじめ所定の添加率の化学混和剤を混合した練混ぜ水を投入した。そして、低速で 60 秒間練り混ぜた後、30 秒間休止し、その後、高速で 90 秒間練り混ぜた。さじで 10 回かき混ぜた後、JIS R 5201 に準拠してフロー試験を行い、フロー値が許容値 160±10mm に収まったら、φ50×100mm プラスチック製型枠に打ち込んだ。1 調合で 9 体の供試体を作製した。その後、型枠上部にラップをし、温度 20±2℃、湿度 60±5% の恒温恒湿室に静置した。封緘養生供試体については、ラップの上からプラスチック製の蓋もかぶせた。標準養生供試体は、材齢 3 日で脱型し、調合ごとに水を張った蓋付きのプラスチック製容器内で養生した。これは、セメントの水和反応で生成される Ca(OH)₂ が養生水中に溶け出し、BFS のポゾラン反応に寄与することがないようにするた



(a) シリーズ I (CCU 粉体を使用)



(b) シリーズ II (CaCO₃を使用)

図-1 ペーストの圧縮強度

めである。所定の養生が終了した当日に研磨を行い、JIS A 1108 に準拠して圧縮強度試験を実施した。なお、シリーズ I の標準養生供試体の No.14E (C0B75E25) および No.15E (C0B100E0) は材齢 3 日では完全に硬化しておらず、それぞれ材齢 1 週間および 2 週間で脱型した。No.11E (C0B0E100) については、封緘養生 91 日においても硬化していなかったため脱型できず、圧縮強度試験が実施できなかった。シリーズ II の No.14L, No.15L, No.11L もそれぞれ同様の状況であった。

3.3 実験結果および考察

表-3 の化学混和剤の添加率の結果によれば、シリーズ I とシリーズ II とともに、調合によらず、セメントに使用する一般的な化学混和剤でフロー値を制御できること分かる。また、CCU 粉体の割合に比例して混和剤の添加率が高くなっている。この傾向は、コンクリートに関する既往の研究と同様であった⁷⁾。

図-1 にペーストの圧縮強度を示す。図-1 (a) のシリーズ I の結果によれば、標準養生 28 日と標準養生 91 日を比較すると、概ね、養生材齢が長いほど、圧縮強度が高くなること分かる。一方、標準養生 91 日と封緘養生 91 日を比較すると、調合によって強度発現の傾向が異なっており明確な傾向は確認できない。しかし、養生方法によらず、調合による大小関係は概ね同じである。なお、No.12E~No.15E はセメントを使用していないが、強度発現が認められた。原因は不明だが、BFS のみの No.15E についても強度発現していることから、今回使用した BFS に自硬性があった可能性が考えられる。また、No.12E~No.14E については、BFS の自硬性に加えて、CCU 粉体が BFS の潜在水硬性を促進した可能性⁸⁾ も考えら

れ、強度発現メカニズムについては、今後の検討課題である。また、図-1 (b) のシリーズ II の結果によれば、シリーズ I とほぼ同様の結果となっている。なお、シリーズ I とシリーズ II を比較すると、CCU 粉体や CaCO₃ を使用していない調合においても圧縮強度の値が異なっている。今回、おおよその強度発現の傾向が把握できたため、今後、調合を絞って同シリーズの実験として再実験し、その原因を究明する予定である。

POC に関する検討で用いるペーストの調合を選定するにあたり、POC の養生方法および強度試験材齢から、シリーズ I における標準養生 28 日の試験結果と CO₂ 排出量から総合的に判断することにした。その結果、最も圧縮強度が高かった No.6E (C50B50E0) ならびに圧縮強度の試験結果と CO₂ 排出量の計算結果より No.8E (C25B25E50) および No.9E (C25B50E25) に基準となる No.1E (C100B0E0) を加えた 4 調合とすることにした。

4. POC に関する検討

前章の実験結果を踏まえ、No.1E, No.6E, No.8E および No.9E のペーストの調合を用いて、それぞれ 3 水準の設計空隙率 (12.5%, 20% および 27.5%) の POC を作製し、圧縮強度と透水係数について確認を行った。

4.1 調合表

表-4 に POC の調合表を示す。水粉体比は 25% とし、ペーストが粗骨材間に入り込むことによる影響を考慮した低減係数 α ⁹⁾ は、調合によらず 0.90 とし調合設計を行った。ペーストのフロー値の許容値を 160±10mm とするように化学混和剤の添加率で調整した。同表には、化学混和剤の添加率、フロー値および CO₂ 排出量を併記

表-4 POCの調合表

調合 No.	記号	W/P (%)	設計空隙率 (%)	単位量 (kg/m ³)					SP (P×%)	FL (mm)	CO ₂ 排出量 (kg/m ³)				
				W	C	BFS	E	G							
1E	C100B0E0	25	12.5	140	560	0	0	1507	0.13	161	462				
			20	107	427										
			27.5	74	295										
6E	C50B50E0		12.5	137	273	273						261	0.11	160	242
			20	104	209	209									
			27.5	72	144	144									
8E	C25B25E50		12.5	130	130	130						199	0.74	151	20
			20	100	100	100									
			27.5	69	69	69									
9E	C25B50E25	12.5	133	133	265	133	0.36	152	77						
		20	101	101	203										
		27.5	70	70	140										

[註]W/P:水粉体比, P:粉体(C+BFS+E), W:水, C:セメント, BFS:高炉スラグ微粉末, E:CCU粉末, G:粗骨材, SP:高性能減水剤, FL:フロー値

している。

4.2 実験方法

POCの練混ぜには、70Lの揺動攪拌式ミキサーを用いた。練混ぜ手順は、まず、粉体およびあらかじめ所定の添加率の化学混和剤を混合した練混ぜ水を投入し、30秒間練り混ぜた後にかき落としを行い、3分間練り混ぜた。ミキサーからペーストを取り出してフロー試験を行い、フロー値が許容値 160±10mm に収まることを確認した後、ペーストをミキサーに戻した。次に、骨材を投入し、2分間練混ぜた後に練り舟に排出してから、φ100×200mmプラスチック製型枠6体の打込みを行った。打込みの際、調合表から型枠の容積に応じた POC 質量を算出し、所定量を型枠に打ち込むことにより空隙率の管理を行った¹⁰⁾。締め固めは、2層各層を突き棒と木槌で締め固め、打込み面から鋼製のタンピング治具を用いて電動ハンマ(2900 min⁻¹)で振動を加え、コテで仕上げて湿布養生とした。なお、各調合 No.の設計空隙率 27.5%の POC の練混ぜ時には、ペースト圧縮強度試験用としてφ50×100mm 供試体4体分のペースト容積を追加計量して練り混ぜた。そして、骨材投入前に追加計量分のペーストを採取して、φ50×100mm プラスチック製型枠4体の打込みを行った。

約20℃に管理された実験室で3日間の湿布養生をした後に脱型し、調合ごとに水を張ったプラスチック製容器内で養生した。材齢27日に供試体6体の内から3体を取り出し、両端面を硫黄でキャッピングし、材齢28日で圧縮強度試験を行った。

プラスチック製容器内の pH が調合によって差がなくなつてから、残りの3供試体を1つの養生水槽に移動した。その後、既往の研究¹¹⁾を参考にして透水試験装置(図-2参照)を作製し、定水位透水試験¹²⁾を実施した。透水カラーには、内径102mm、長さ550mmのアクリル

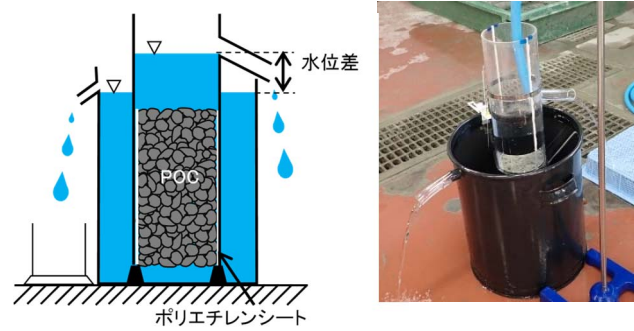


図-2 透水試験装置

パイプを使用した。越流量が一定になった後、30秒間の越流量を各水準3回測定した。透水試験時の水温は10.5℃で、実測の水位差は、設計空隙率12.5%は11cm、設計空隙率20%は10cm、設計空隙率27.5%は8.5cmであった。得られた実測値から式(1)および式(2)より透水係数 K_{15} を算出した¹²⁾。

$$K_T = \frac{H \times Q}{h \times A \times \Delta t} \quad (1)$$

$$K_{15} = K_T \frac{\eta_T}{\eta_{15}} \quad (2)$$

ここに、 K_T :測定時の水温 $T^\circ\text{C}$ における透水係数(cm/s),
 H :供試体高さ(cm), Q :越流量(cm³), h :水位差(cm), A :供試体の断面積(cm²), Δt :測定時間(s), K_{15} :水温15℃における透水係数(cm/s), η_T/η_{15} :粘性係数の比

4.3 実験結果および考察

表-4のCO₂排出量に注目すると、今回の調合設計では粗骨材の量を固定しているため、粗骨材の容積および設計空隙率を差し引いた残りの容積がペースト容積となることから、設計空隙率が低いほど、CO₂排出量が多くなっている。また、一般的なコンクリート1m³のCO₂排

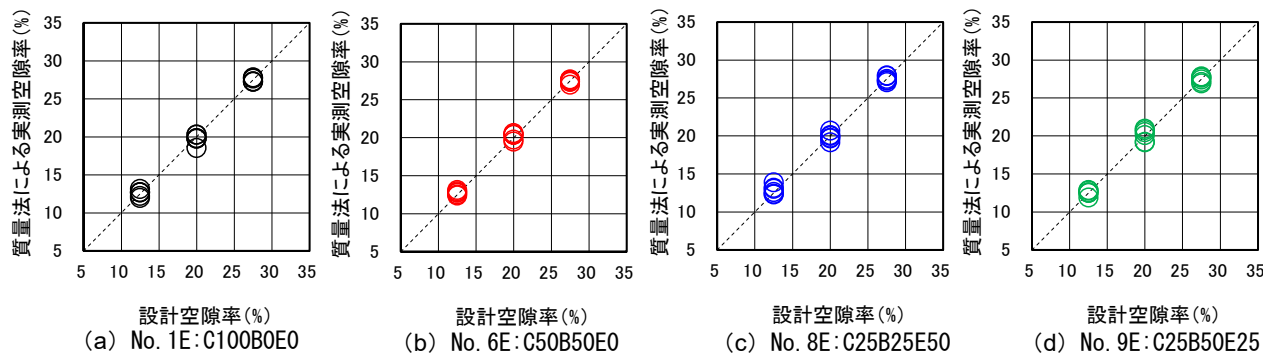


図-3 質量法による実測空隙率と設計空隙率の関係

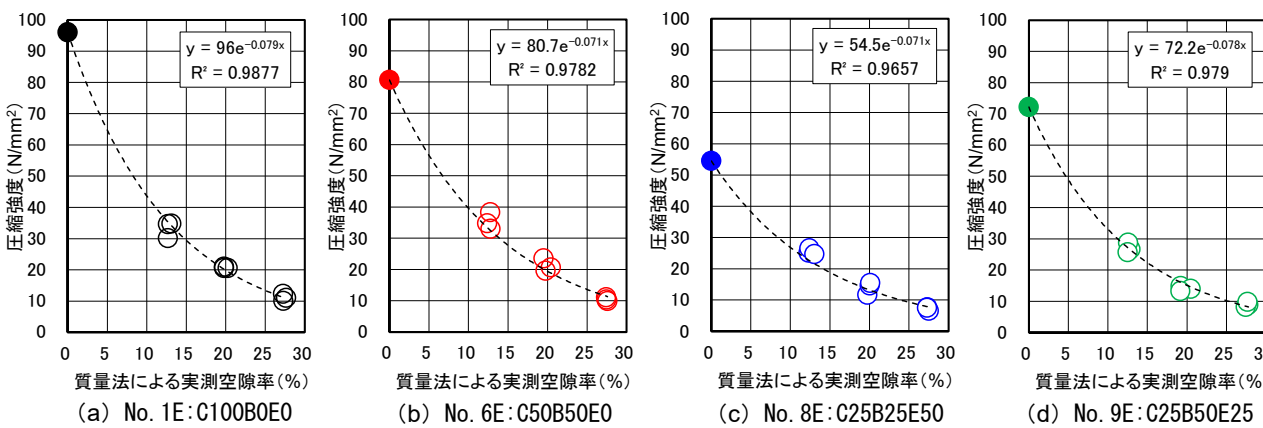


図-4 圧縮強度と質量法による実測空隙率の関係

出力は約300kgと言われており、No.1Eの設計空隙率20%と比較すると、POCのCO₂排出量は20%ほど多い。設計空隙率によって若干異なるが、普通POC (No.1E)のCO₂排出量に対する低炭素型POC (No.6E, No.8E, No.9E)の割合は、それぞれNo.6E:約53%, No.8E:約6%, No.9E:約18%となっている。

図-3に質量法による実測空隙率と設計空隙率の関係を示す。質量法による実測空隙率と設計空隙率の差は±1.5%以内であった。このことから、調査によらず、ほぼ設計空隙率どおりの空隙率を有する供試体を作製できていると言える。

図-4に圧縮強度と質量法による実測空隙率の関係を示す。実測空隙率0%の値はペーストの圧縮強度を示しており、No.1Eでは96.0N/mm²、No.6Eでは80.7N/mm²、No.8Eでは54.5N/mm²、No.9Eでは72.2N/mm²であった。図中の近似曲線は、式(3)の指数関数によって近似¹³⁾したものである。

$$F_c = A \times e^{-Bx} \quad (3)$$

ここに、 F_c : POCの圧縮強度 (N/mm²)、 A : ペーストの圧縮強度 (N/mm²)、 B : 実験定数、 x : 空隙率 (%)

低炭素型 POC の圧縮強度と質量法による実測空隙率

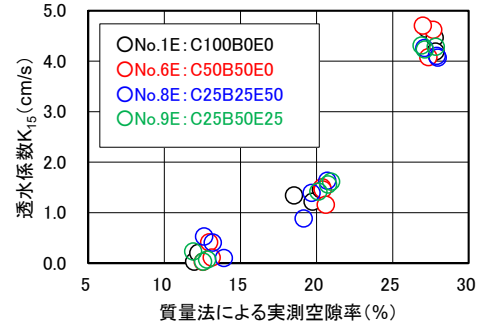


図-5 透水係数と質量法による実測空隙率の関係

の関係は、普通 POC と同様に、ペースト強度を切片とした指数関数で表すことができることが分かる。

植栽重視の護岸では、空隙率を25%程度確保することが望ましく、設計基準強度を10N/mm²以上として設計される¹²⁾。本実験における設計空隙率27.5%のPOCの圧縮強度は、No.1E:11.1N/mm²、No.6E:10.4N/mm²、No.8E:7.2N/mm²、No.9E:9.0N/mm²であった。

図-5に透水係数と質量法による実測空隙率の関係を示す。バラツキはあるものの、低炭素型 POC (No.6E, No.8E, No.9E)の透水係数は、普通 POC (No.1E)と同程度であることが分かる。また、透水係数は、調査によらず、実測空隙率が高いほど大きくなっており、既往の研究と同様の結果であった^{例え 14)}。さらに、透水性アスファルト舗装の透水係数の下限値は0.01cm/sとされているが¹⁵⁾、調査によらず下回るものはなかった。コンクリ

ート舗装では、曲げ強度 $4.5\text{N}/\text{mm}^2$ 以上¹²⁾が必要となる。ここで POC の圧縮強度に対する曲げ強度の比を $1/5^3)$ とすると、本実験における設計空隙率 12.5%の POC の圧縮強度から推定した曲げ強度は、No.1E: $6.6\text{N}/\text{mm}^2$, No.6E: $7.1\text{N}/\text{mm}^2$, No.8E: $5.1\text{N}/\text{mm}^2$, No.9E: $5.4\text{N}/\text{mm}^2$ であった。

以上のことから、ペーストの水粉体比や粉体の質量割合などをさらに詳しく検討する必要はあるが、社会実装可能な低炭素型 POC の製造が可能であることが示唆された。

5. 結論

本研究では、カーボンニュートラル社会の実現を目指す取組みの一手法として、低炭素型 POC を製造し、その基礎特性の把握を試みた。得られた知見を以下に示す。

- (1) セメントに使用する一般的な化学混和剤で、低炭素型のペーストのフロー値を制御できる。
- (2) シリーズ I と II とともに、概ね、養生材齢が長いほど圧縮強度が高くなった。一方、標準養生と封緘養生を比較すると、割合によって強度発現の傾向が異なった。
- (3) 低炭素型 POC も、普通 POC と同じ製造方法で、設計空隙率どおりの空隙率を有する供試体を作製することができる。
- (4) 低炭素型 POC の圧縮強度と質量法による実測空隙率の関係は、普通 POC と同様に、ペースト強度を切片とした指数関数で表すことができる。
- (5) パラツキはあるものの、低炭素型 POC の透水係数は、普通 POC と同程度である。
- (6) 圧縮強度や透水係数の試験結果と CO_2 排出量の計算結果などから、社会実装可能な低炭素型 POC の製造が可能であることが示唆された。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、永井太千氏（広島工業大学卒業生）のご助力を得た。本研究費の一部は、科学研究費助成事業 基盤研究 (C) (課題番号: 24K07775) によった。本研究において、太平洋セメント株式会社、日鉄高炉セメント株式会社、株式会社まるせ、株式会社フローリックから材料を提供して頂いた。ここに付記して謝意を申し上げる。

参考文献

- 1) 一般社団法人日本建設業連合会：低炭素型コンクリートの普及促進に向けて一低炭素社会・循環型社会の構築への貢献一、2016.4
- 2) 田中寛人，神代泰道，井上裕太，並木憲司：CCU 粉体を混入した低炭素型のコンクリートの品質・施工性

に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.46，No.1，pp.1393-1398，2024

- 3) 畑中重光編著：透水性コンクリート (POC) の基礎と実践一環境共生と豪雨対策を目指して一，コンクリート新聞社，pp.49-134，2019
- 4) 阿部珠子，今本啓一，エルドンオチル，田中章夫：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基本物性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.46，No.1，pp.1297-1302，2024
- 5) 佐々木猛，八木利之：エコタンカル（軽質炭酸カルシウム）とその可能性，セメント・コンクリート，No.900，pp.58-62，2022
- 6) 日本コンクリート工学会：セメント・コンクリートの環境影響評価に関する研究委員会報告書，pp.111-144，2024.9
- 7) 松沢友弘，安田玲子，西祐宜，向俊成： CO_2 を固定化した軽質炭酸カルシウムを多量に混和したコンクリートの基礎的特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.46，No.1，pp.2113-2118，2024
- 8) 古川雄太，香月智佳，大岡督尚：軽質炭酸カルシウムおよび酸化カルシウムが高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートに及ぼす影響に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.46，No.1，pp.1375-1380，2024
- 9) 平岩陸，田中清人，谷川恭雄，森博嗣：ポーラスコンクリートの調合設計法に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.1，pp.121-126，2001
- 10) 前川明弘，山本晃，三島直生，畑中重光：小粒径ポーラスコンクリートの空隙率測定方法に関する研究，第 60 回セメント技術大会講演要旨，pp.218-219，2006
- 11) 夏目実穂，三島直生，畑中重光：ポーラスコンクリートの透水試験結果に及ぼす測定条件の影響に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，pp.1690-1695，2014
- 12) 日本コンクリート工学会：性能設計対応型ポーラスコンクリートの施工標準と品質保証体制の確立研究委員会報告書，2015.6
- 13) 湯浅幸久，畑中重光，三島直生，前川明弘，宮本高秀：ポーラスコンクリートの振動締固めに関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，第 552 号，pp.37-44，2002.2
- 14) 前川明弘，畑中重光，三島直生，山本晃：小粒径ポーラスコンクリートの基礎的特性に関する実験的研究，セメント・コンクリート論文集，No.60，pp.264-270，2006
- 15) 国土交通省大臣官房官庁営繕部整備課：構内舗装・排水設計基準の資料，p.10，2015