

論文 電気炉酸化スラグ粗骨材を全量使用したコンクリートの各種特性とライフサイクルによる環境影響評価

吉岡 優志郎*1・川崎 佑磨*2・武山 健太郎*3・光斎 翔貴*4

要旨: 電気炉酸化スラグをコンクリート用骨材として利用することで、骨材供給リスクの低減やスラグの利用先として期待できるが、骨材を高置換するとコンクリートの特性に影響を与えることが予想される。そこで粗骨材を電気炉酸化スラグに全量置換したコンクリートの特性について比較と評価を行うことを目的とした。その結果、本検討の範囲では電気炉酸化スラグに置換することでフレッシュ性状ではコンクリート内に水が捕捉され、硬化後の特性では物質移動抵抗が低くなることが推察された。また、製造にかかるライフサイクルアセスメントの解析も行い、CO₂排出量は僅かながら低減できることが示唆された。

キーワード: 電気炉酸化スラグ, ブリーディング, 余剰水, 耐久性, ライフサイクルアセスメント

1. はじめに

近年、環境保全や循環型社会を支持する情勢により、天然骨材の採取が制限され天然骨材資源の枯渇化や低品質化が問題視されている。そこで注目されているのが産業副産物由来の骨材である。なかでも金属の製錬時に排出されるスラグを JIS 規格に則って粒度調整した鉄鋼スラグ骨材が注目されている。鉄鋼スラグの中でも電気炉系スラグは、他の鉄鋼スラグに比べ埋め立て処理される量や割合が最も多い¹⁾。また、電気炉は鉄スクラップから製鉄した際の副産物のため、カーボンニュートラルの観点からも今後の需要が高くなることが予想される。電気炉系スラグは電気炉酸化スラグと電気炉還元スラグがあり、生成量の約65%を電気炉酸化スラグが占めている。また、電気炉酸化スラグは還元スラグに比べ、遊離石灰などの不安定な鉱物をほとんど含まないためコンクリートの利用が可能である²⁾。電気炉酸化スラグ骨材を用いたコンクリートは、一般的なコンクリートに比べて密度が大きいため、堤防やテトラポットなどの防災・減災設備としての活用が期待できる。しかし、一般的にスラグ骨材の置換率を上昇させていくとブリーディングの増大に伴う施工性能の悪化や、強度低下などの負の影響が考えられる。特に、電気炉酸化スラグは密度が大きく、材料分離抵抗性や流動性の問題が予想される。加えて、電気炉酸化スラグ細骨材に比べて、電気炉酸化スラグ粗骨材を高置換率で検討を行った報告は極めて少ない。また、これまでライフサイクルの観点から鉄鋼スラグを粗骨材に代替した場合の製造にかかるCO₂排出量は推計されてこなかった。

上記を踏まえて本研究では、電気炉酸化スラグ粗骨材

を全量置換したコンクリートの基礎的な研究として、フレッシュ性状および硬化後の特性に関する試験および評価を行って比較検討することを目的とした。また、ライフサイクルアセスメント (LCA) を用いて、電気炉酸化スラグ粗骨材を置換することで実際にコンクリート製造までのCO₂をどの程度削減できるかの検討も行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

本研究での使用材料として、セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は砕砂(硬質砂岩)、粗骨材は砕石(硬質砂岩)と電気炉酸化スラグ(EFG)、混和剤は高性能AE減水剤(Ad1)とAE剤(Ad2)を使用した。骨材は全て表乾状態で使用した。コンクリートの配合を表1に示す。普通粗骨材を使用したN-46と電気炉酸化スラグ粗骨材を使用したE-46の2ケースに加えて、電気炉酸化スラグに置換したことにより材料分離抵抗性が下がる可能性を考慮し、粘性を上げるためs/aを46.5から51.5に上げたE-51の3ケースで比較と評価を行った。目標空気量は4.5±1.5%、目標スランプは12±2.5cmとした。

2.2 電気炉酸化スラグ

電気炉は製鉄工程の一つで、電気炉では鉄スクラップをアーク熱で加熱、溶解した後、1500~1600℃の溶鋼中に酸素を吹き込み不要な成分を酸化、除去する酸化精錬を行う。この時に電気炉酸化スラグが生成される。溶解中に酸化除去されたFeO、MnO、SiO₂、Al₂O₃と精錬時に加えられるCaOを主成分としている。これらの酸化物がそれぞれ結合しているため、化学的に安定した鉱物相となり膨張することがない。電気炉酸化スラグは JIS A

*1 立命館大学 理工学研究科環境都市専攻 (学生会員)

*2 立命館大学 理工学部環境都市工学科准教授 博士(工学) (正会員)

*3 東京大学大学院 工学系研究科特任助教 博士(工学) (非会員)

*4 立命館大学 グローバル・イノベーション研究機構准教授 博士(エネルギー科学) (非会員)

表-1 コンクリートの配合

配合名	W/C(%)	s/a(%)	単位量(kg/m ³)								単位容積質量(kg/m ³)	SL(cm)	Air(%)	temp(°C)
			W	C	S	1505	2010	EFG	Ad1	Ad2				
						G1	G2							
N-46	55	46.5	175	318	828	388	582	-	1.59	0.95	2291	13.5	5.8	25.4
E-46		-			-	1334	1.91	0.32	2655	10.0	4.1	25.9		
E-51		51.5			917	-	-	1209	2.55	0.16	2619	12.5	4.9	20.6

表-2 各粗骨材の特性

	産地/供給地	表乾密度(g/cm ³)	絶乾密度(g/cm ³)	吸水率(%)	粗粒率	単位容積質量(kg/m ³)	実積率(%)	新モース硬度
砕石2010	甲賀市土山産	2.67	2.66	0.47	7.06	1.58	59.4	6程度
砕石1505		2.67	2.66	0.56	6.39	1.55	58.3	6程度
EFG2005	愛知県弥富市	3.67	3.64	0.91	6.51	2.15	59.1	6以上

5011-4においてコンクリート用の骨材として規格されている。電気炉酸化スラグ粗骨材と普通骨材の特性を表-2に示す。電気炉酸化スラグ粗骨材はEFG、電気炉酸化スラグ細骨材はEFSと示す。電気炉酸化スラグ骨材の密度は、一般的な骨材と比べて約40%大きいため、電気炉酸化スラグ骨材を用いたコンクリートの単位容積質量も大きくなる。また、電気炉酸化スラグ骨材は形状が砕石と比べて角張っているためコンクリートの単位水量の増加やブリーディングの増大を招きやすく、ワーカビリティの低下や品質の低下が懸念される。

2.3 試験項目

フレッシュ性状については、ブリーディング試験とL型フロー試験を行った。ブリーディング試験は日本コンクリート工学会が制定したJCI-S-015-2018「小型容器によるコンクリートのブリーディング試験方法」³⁾に準拠して、温度は20°Cで湿度は60%の環境下で行い、φ150mm×h300mmの容器を用いて実施した。硬化後の特性については、圧縮強度試験と中性化促進試験、凍結融解試験を行った。圧縮強度試験はJIS A 1108に準拠して行った。促進中性化試験はJIS A 1153に準拠して行き、測定する試験体には100×100×400mmの角柱供試体を用いた。また、中性化深さの測定はJIS A 1152に準拠して行った。測定箇所は100×100mm断面の高さ方向片側5箇所ずつ、1供試体あたり合計10箇所とし、1ケースあたり3体計測した平均値を評価した。凍結融解試験はJIS A 1148のA法に準拠して行き、測定する試験体には100×100×400mmの角柱供試体を用いた。

2.4 L型フロー試験

L型フロー試験機器を写真-1に示す。試験器を水平に置きA区間とB区間を仕切り、A区間に練り混ぜたコンクリートを高さ1/3まで入れて突き棒で5回突いた。それを2度繰返した後、上面を平らに均し、上面から見

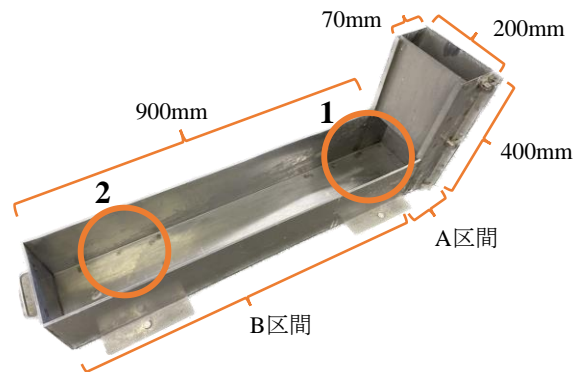


写真-1 L型フロー試験機器

て中央の位置に棒状振動機を挿入した。挿入深さは振動機の先端がL型フロー試験機の底から5~10cmになるように支えた。棒状バイブレータは振動体の直径28mm、出力280W、振動数200~242Hzのものを用いた。A区間とB区間の仕切りを外し、コンクリートの流動距離を計測した。その際に流れるコンクリートを動画で撮影した。仕切りを取るだけでは流れないため、その後に15秒の振動を加えた。その際に流れるコンクリートの距離を計測し、動画で撮影した。A区間および仕切り付近(丸1)と流れたコンクリートの先端(丸2)から、圧縮供試体作製のプラモールドにすり切りまでコンクリートを採取した。採取する際にプラモールドの高さの半分までコンクリートを入れて、突き棒で5回突いた。それをもう一度繰返し、打込んだコンクリートは5mmふるいにかけて粗骨材のみを取り出し、粗骨材質量を計測した。

2.5 LCA

表-1に示す3配合のコンクリート製造にかかるCO₂排出量を推計するために、ライフサイクルアセスメント(LCA)を実施した。LCAとは、ある製品・サービスのライフサイクル全体(資源採取-原料生産-製品生産-流通-消費-廃棄-リサイクル)またはその特定段階に

おける環境負荷を定量的に評価する手法である。LCA については、ISO (国際標準化機構) による環境マネジメントの国際規格の中で、ISO 規格が作成されている。

本研究では、コンクリートの製造までをシステム境界とした。各種コンクリートの成分をライフサイクルインベントリーデータベース (IDEA ver.3) と紐付け、その製造にかかる CO₂ 量を概算した。また、ミキサー稼働時における電力量をデータロガーで収集し、2022 年度の日本の電力ミックスから CO₂ 排出量を求めた。機能単位は体積あたりの CO₂ 排出量とした。

3. フレッシュ性能に関する実験結果

3.1 ブリーディング試験

ブリーディング試験結果を図-1 に示す。E-46 は N-46 と比較すると、約 0.05cm³/cm² 低くなった。一般的に粗骨材の密度が大きくなると粗骨材とモルタルの密度差が大きくなり材料分離抵抗性が下がることがわかっている⁴⁾。つまり、EFG を全量置換すると、ブリーディング量が通常のコンクリートよりも増加することが推察できる。しかし、E-46 の方が N-46 に比べてブリーディング量が減少した。この要因として、EFG がブリーディング水の上昇を妨げている可能性が考えられる。また、EFG は普通骨材と比べ気泡が多いため内部にブリーディング水を吸水されている可能性が考えられる。ブリーディング水を妨げている場合、骨材下部に比較的大きな空隙ができることも想定され、耐久性の低下が示唆される。初期のブリーディング量を比較すると、E-46 の方が N-46 と比べて高い値となっている。初期のブリーディングは骨材の重さによる圧密が関係しているため、EFG の密度の大きさが影響していると考えられる。内部に余剰水が残っていると乾燥収縮の増加や硬化後に余剰水が蒸発して内部空隙が多く残るなどの問題が考えられる。次に E-51 は E-46 と比較すると約 0.04cm³/cm² 低い値となった。コンクリートの微粒分量がブリーディングに関係している⁵⁾。よって、*s/a* を上げたことにより微粒分が増えて材料分離抵抗性が向上しブリーディングを抑制したと考える。

3.2 L 型フロー試験

L 型フロー試験結果を図-2、図-3 に示す。先端から出た水の様子を写真-2 に示す。E-46 は、N-46 と比べて流動距離が約 350mm 減少し、粗骨材割合の差は約 2.5% 増加した。流動距離は EFG の密度が高いことで流動性が下がり減少したと考える。粗骨材割合の差では、EFG の密度が高いことにより材料分離抵抗性が低下し N-46 と比べて均一に流動しなかったと考える。L 型フローの先端から出た水を比べると長さが E-46 の方が約 16cm 多く出しておりコンクリートから水が多く出ていることがわかる。写真-2 を見ても E-46 のコンクリートの水分が少な

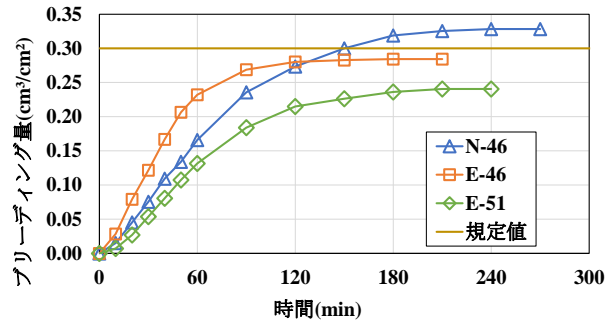


図-1 ブリーディング試験結果

いことが確認できる。このことから材料分離傾向であることがわかった。また、ブリーディング試験では出てこなかった水は、骨材を EFG に置換したことによる化学的的な反応で出なかったのではなく、EFG の形状の違いによってコンクリート内部に余剰水として残留している可能性が高い。次に E-51 は、E-46 と比べて流動距離では約 200mm 増加し、粗骨材割合では正負の違いはあるが近い値になった。流動距離は E-51 の方が E-46 と比較して粗骨材が減ったことが影響して増加したと考える。また、E-51 は 5 秒後も流動距離が徐々に増加しており、*s/a* を上げたことによって粘性が上がったためだと考えられる。L 型フローの先端から出た水を比べると E-51 の方が約 14cm 減少したことからコンクリートから出る水の量が減少したことがわかる。これは *s/a* を上げたことにより微粒分が増加し、材料分離抵抗性が上がったためと考える。このことから、微粒分を増加することで内部に残

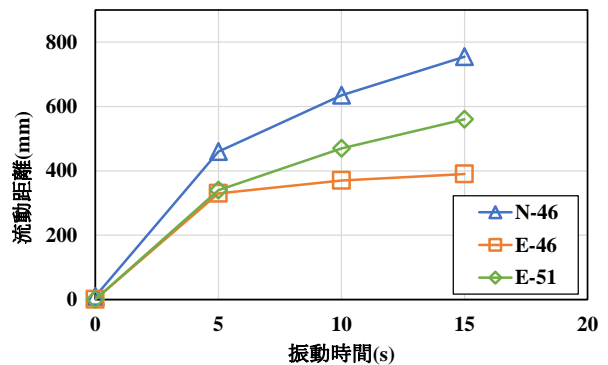


図-2 L 型フロー試験による流動距離

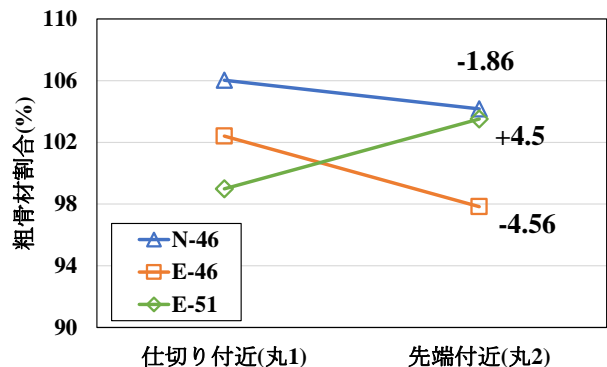


図-3 L 型フロー試験による粗骨材割合

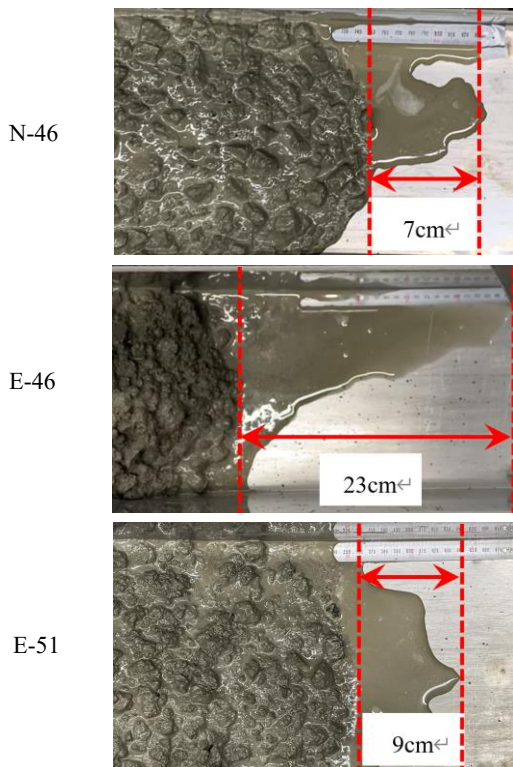


写真-2 L型フロー試験結果

る余剰水を改善や材料分離抵抗性が向上する可能性が考えられる。以上から、ブリーディング試験ではE-46のブリーディング量がN-46よりも低かったが、L型フロー試験では先端から大量の水が漏出した。すなわち、ブリーディング試験中においてもE-46では試料中に余剰水として水を蓄えており、その上昇を骨材とセメントペースト界面あるいはセメントペースト中に保持していたことが推察される。L型フロー試験では振動および試料が流動することによって、捕捉していた水が流れやすくなったのではないかと推察した。

3.3 振動下におけるブリーディング

上述の考察から、ブリーディング試験でも試料に振動を加えることでL型フロー試験と同様の結果が確認できるのではないかと考えた。そこで、既往研究を参考に通常の試験行程中の突き固めを振動締めめに転換してブリーディング試験を行った⁹⁾。振動は供試体作製時と同様に棒状振動機を使用し5秒の振動で行った。その試験結果を図-4に示す。振動有り同士の比較ではE-46の方が約 $0.07\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 少なかった。振動を加えたことで相対的に2配合ともブリーディング量が増加しており、振動によって内部の水がより上昇しやすくなったことがわかる。一方で、L型フロー試験のようにE-46から漏出する水量が大きく増加することはない。このことから、型枠で上面以外を閉鎖されている場合は振動を加えても余剰水が内部に残っていると考える。この点については、今後より詳細な検討を進めて考察の妥当性を検証していく。

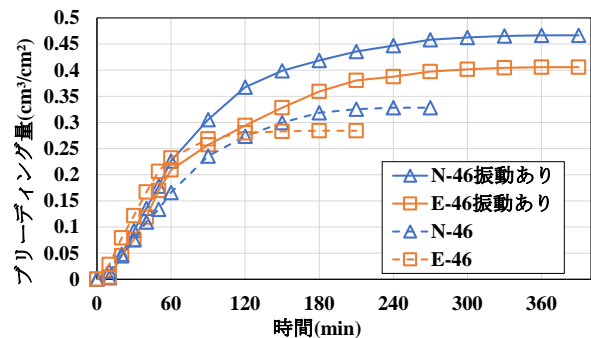


図-4 振動ありブリーディング試験結果

4. 硬化性状に関する実験結果

4.1 圧縮強度試験

圧縮強度試験結果を図-5に示す。E-46は、N-46と比較して約 $7\text{N}/\text{mm}^2$ 増加した。これは、EFGが普通骨材と比べて新モース硬度6以上と硬いことや単位体積質量が大きいことが影響していると考えられる。また、EFGの形状が角張っているという特徴があるためモルタルとの付着力が向上し強度に影響を与えたと考えられる。次に、E-51は、E-46と比べて約 $1\text{N}/\text{mm}^2$ 低下している。粗骨材量が減少しているため強度が低下したと考えられる。しかし、その差は小さく、材齢28日ではE-51の方が大きい値となっている。このことから両ケースには大きな差はないと考える。

4.2 促進中性化試験

18週目時点の促進中性化試験結果を図-6に示す。18週目時点において、E-46の中性化深さはN-46と比較して約 2mm 増加した。材齢91日の圧縮強度では、E-46の方がN-46よりも $6\text{N}/\text{mm}^2$ 大きい。通常、圧縮強度と弾性係数は比例関係にあり、強度が大きいほどセメントペーストは緻密で物質移動抵抗性は高い。しかし、E-46では強度は高いが中性化促進試験では材齢初期から中性化深さがN-46よりも大きいことが確認できた。これはフレッシュ性状の試験結果から、EFGを全量置換したコンクリートは内部に余剰水が多く捕捉されている可能性が示唆したが、その余剰水が内部空隙となり中性化の進行を早めたと推察される。E-51は、E-46と比べて約 1.3mm 増

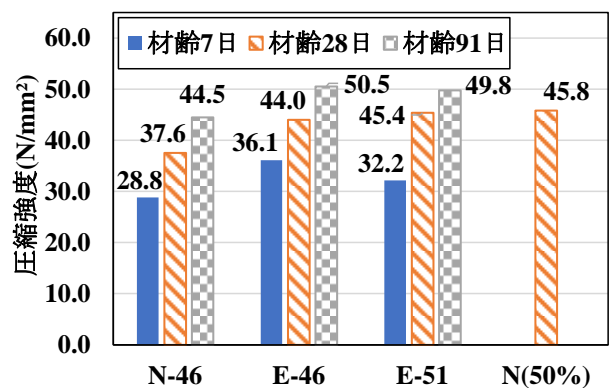


図-5 圧縮強度試験結果

加した。これは、モルタル部において物質移動抵抗性が低い細骨材比が大きくなり、中性化の進行を進めたと考える⁷⁾。また、E-46 よりも多くの余剰水が内部に残っている可能性も考えられる。

4.3 凍結融解試験

凍結融解試験の結果を図-7 に示す。また、表面や破壊断面の様子を写真-3、写真-4 に示す。90 サイクル時点の質量では、EFG を使用した 2 配合が N-46 と比べて増加している。また、EFG を使ったコンクリートは 90 サイクルで崩壊したため、ここまでの結果とした。中性化促進試験と同様に、凍結融解試験でも圧縮強度が高いにも関わらず N-46 よりも非常に早く崩壊に至った。これは前述までの考察と同様に、EFG を用いたコンクリートはフレッシュ時に内部に残留する余剰水が多く、その影響で内部空隙が形成され、その内部空隙に水が満たされて質量が増加したと考えられる。また、凍結によって多くの箇所ではひび割れが発生して、以降は多くのひび割れや空隙内に含水して早期の崩壊に至ったと考えられる。また、EFG を使ったコンクリートは寸法も増加しており（長さ：400mm から 403mm に増加）、表面の観察結果では N-46 と比べて大きな破壊は少なく亀甲状のひび割れのみが確認できるため、内部に多くのひび割れが内在していることが推察される。破壊断面から N-46 は骨材と

モルタルの界面が破壊しているのに対し EFG を用いたコンクリートはモルタル部に多くのひび割れが確認できた。このことから、凍結融解によってモルタル部が脆弱になった可能性が考えられる。

5. LCA 結果

LCA による単位体積あたりの CO₂ 排出量の結果を図-8 に示す。この結果より全種類においてコンクリート製造時にかかるその排出量にはほとんど違いがないことがわかる。これはセメント製造の CO₂ 排出係数が最も大きいことに起因する。電気炉酸化スラグ粗骨材を用いた場合の方が僅かに減少しており、これは砂による骨材製造の方が電気炉酸化スラグと比べ CO₂ 負荷が大きいことに起因する。

重さあたりではほとんど変わらないものの、性能の観点からみると解釈は異なる。例えば、高強度性能の観点

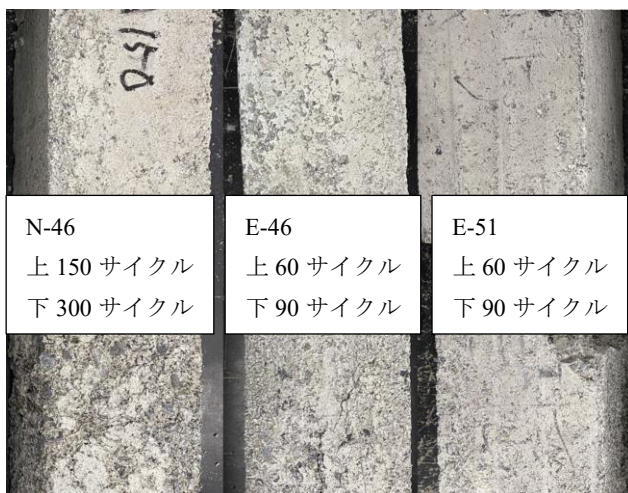


写真-3 凍結融解試験による供試体表面

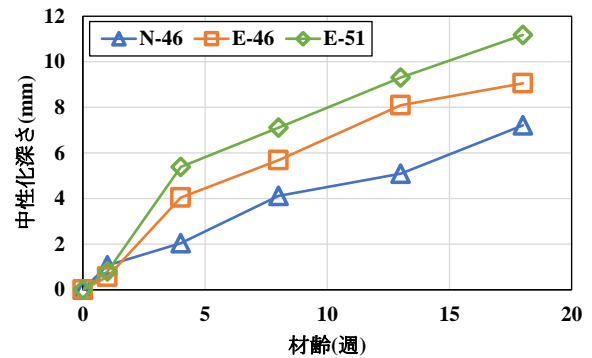


図-6 促進中性化試験結果 (18 週目まで)

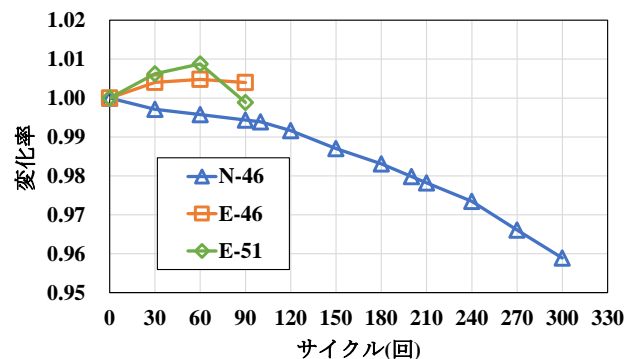


図-7 凍結融解試験による質量変化率

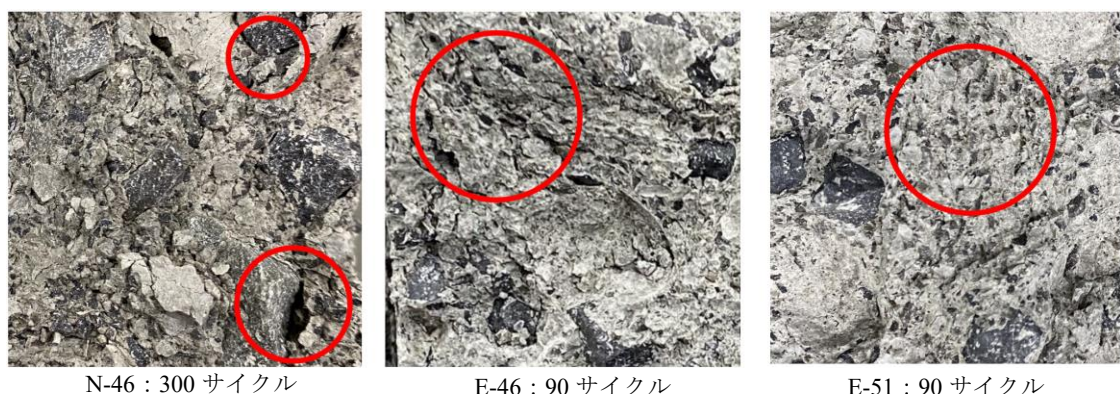


写真-4 凍結融解試験による供試体破壊断面

から見れば、電気炉酸化スラグ粗骨材を用いたコンクリートは強度あたりの CO₂ 排出量は低減する結果となる。すなわち、N-46 を E-46 と同等の強度にするためには図-5 から W/C を 5%程度下げる必要がありセメント量を約 30kg/m³ 増やすことになる。需要先が求める性能の観点によって単位当たりの CO₂ 排出量が異なることから、用途先に合った機能単位の設定が重要となる。また、今回の LCA では天然資源量に対する環境影響については考慮していない。今後は、天然資源から骨材採取することの環境影響も考慮して、スラグ活用の利点について詳細な検討を進める。

6. まとめ

本研究では、電気炉酸化スラグ粗骨材を全量置換で使用したコンクリートの各種特性の検討を行った。本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) フレッシュ性状においては、N-46 と E-46 を比較すると、E-46 の方がブリーディング量は減少したが、普通骨材と比べ EFG の形状の違いからブリーディング水を妨げ、コンクリート内部に余剰水が残留している可能性が示唆された。また、L 型フローのような解放されている状態では振動によって水が漏出するが、型枠のような閉鎖されている状態では水が漏出しにくいことがわかった。E-46 と E-51 を比較すると、E-51 の方がブリーディング量と L 型フローの先端から出た水の量は減少した。s/a を上げたことによる微粒分増加が影響していると考えられる。微粒分を増加することで材料分離抵抗性が向上すると考えられる。
- (2) 硬化後の特性において N-46 と E-46 を比較すると、E-46 の方が圧縮強度は増加した。これは、EFG が硬いことや角張っていることが影響していると考えられる。また、促進中性化試験や凍結融解試験から EFG を使ったコンクリートは物質移動抵抗性が低いことがわかった。E-46 と E-51 を比較すると、E-51 はモルタル部において物質移動抵抗性の低い細骨材比の増加や E-46 より多くの余剰水が残ることが影響し、コンクリートの物質移動抵抗性がさらに低下すると考えられる。本研究では 2 配合のみで比較しているため、今後は、材料設計など材料的な観点も含めて、検討を進める。
- (3) 今回の配合では EFG に全量置換したことで、スランブ試験や空気量試験では確認できない性状差がブリーディング試験と L 型フロー試験で確認できた。圧縮強度と耐久性に関しても、圧縮強度が向上しているのに対して物質移動抵抗性は低下している。フレッシュ性状で確認できた内部の余剰水が影響していると考えられる。中性化の進行が早くなるため無筋

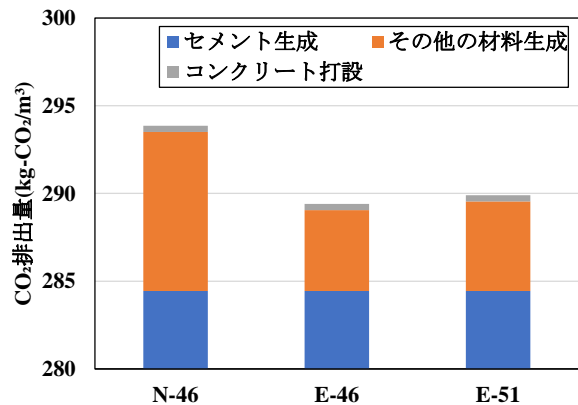


図-8 LCA 結果

コンクリートとして利用すれば CO₂ をより多く吸着するコンクリートとして活用できる用途も考えられる。

- (4) 普通コンクリートと比べて電気炉酸化スラグ粗骨材を全量置換で使用したコンクリートは、その製造時の体積あたりの CO₂ 排出量が僅かながら減少したもののほとんど変化はなかった。これはセメント製造における CO₂ 排出量が大半を占めるからである。

謝辞

電気炉酸化スラグは、(株)星野産商および鉄鋼スラグ協会にご提供頂いた。ここに付記し関係各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) 鉄鋼スラグ協会 電気炉酸化スラグ特別委員会：電気炉酸化スラグ利用研究委員会報告書，2001.8
- 2) JIS A 5011-4 コンクリート用スラグ骨材—第 4 部：電気炉酸化スラグ骨材，2018
- 3) 公益社団法人 日本コンクリート工学会：JCI-S-015-2018「小型容器によるコンクリートのブリーディング試験方法」，2018
- 4) 李柱国：静置状態におけるフレッシュコンクリートのブリーディングモデルに関する理論的研究，日本建築学会構造系論文集，Vol77, No.679, pp1357-1366, 2012.9
- 5) 十河茂幸，加藤佳考，福留和人ほか：構造物の耐久性の向上のためのブリーディング制御，コンクリート工学，Vol.55, No.11, pp.975-982, 2017
- 6) 西村和朗，加藤佳考：振動締固めによる材料分離およびブリーディングが硬化コンクリートの表面張力に与える影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.39, No.1, pp.1423-1428, 2017
- 7) 中田善久，斉藤丈士：同一性セメント比における細骨材の変化が高強度コンクリートの性質に及ぼす影響の一考察，日本建築学会構造系論文集，Vol83, No748, pp751-761, 2018.6