

論文 二次副産材を混和したコンクリートの資源環境保全貢献性とフレッシュ性状への影響

田村 雅紀*¹・依田 和久*²・大島 正記*³・斉藤 順一*⁴

要旨：資源環境や土地利用などのコンクリート製造に関わる資源環境の保全性に向けて、副産微粉を積極利用し、同一産地・種類別の材料選定により得たコンクリートについて、混和する骨材微粉量を変化させたコンクリートを継続的に製造することで、最終処分場の延命効果が得られる可能性を簡易な推計により示した。その上で、同一産地・種類別の材料選定により実際にモルタルおよびコンクリートを製造し、副産微粉の混和によるフレッシュ性状に及ぼす影響について実験的に評価した。

キーワード：資源環境保全、最終処分場、微粉、フレッシュ性状、ブリージング

1. はじめに

国内では、東日本大震災に伴う復興活動をはじめ、都市部や幹線交通網における鉄筋コンクリート造建物の老朽化対策など国土全般のインフラ構築のあり方を再考する状況となっている。そして、既存構造物の維持管理に関しては、従前の構造的機能・性能や使用性を踏まえた物理的耐用年数の確保に加え、構造物への所定の要求性能水準を下回らない形で、一定期間の品質保証を可能とする持続的性質が保有し続けられるかという使用者立場に立脚した視点が重視されつつある。また国内では、「資源環境」や「土地利用」など、土地所有・利用者を絡めた社会的側面が関係する影響領域に関する冗長性

(Redundancy)、頑強性(Robustness)、回復性(Resilience)がそもそも脆弱であるのにも関わらず、建設業は大量の資源とエネルギーを消費し、コンクリート系解体材に関しては2000年には1億t程度が発生し、2055年前後には4億t程度となり排出ピークを迎えると予想されている¹⁾。再生骨材のJIS規格化等による利用促進は期待されるものの²⁾、今後の建設需要見通しや最終処分場確保の問題によりコンクリート系解体材の再利用のあり方は引き続き緊要な課題となっている。その中で、首都圏では骨材採取地の偏在化が進行しており³⁾、今後は、カーボンニュートラル活動の観点⁴⁾から輸送負荷の影響を考慮しつつ、完全循環型の材料選定手法の適用⁵⁾や、副産微粉等の利用促進の影響⁶⁾⁷⁾などを踏まえた、総合的な建設資材利用のあり方を模索する段階にきている。

以上を踏まえ、本研究は、「資源環境」や「土地利用」などのコンクリート製造に関わる間接影響因子の保全性への保全貢献性の評価を目的に、様々な産業活動より生じた粉体系排出物や再生骨材などを二次副産材と位置づ

け、同一産地・種類別(以下、ファミリー型とする)の材料選定を条件に、骨材微粉使用量を増加させたコンクリート製造が最終処分場の残余年数増進に与える環境影響を簡易に試算する(研究1)。その上で、実際に当該コンクリートを製造し、最初の基礎的物性となるフレッシュ性状への影響について実験的に検討を行い(研究2)、最終的に土地利用や資源環境を踏まえた環境保全に資するコンクリート材料の発展的利用のあり方を考察する。

2. 研究概要

2.1 コンクリートの資源環境保全貢献性の視点

コンクリート構造物は、「インフラを築く」という社会的責務を永らく果たしてきたが、東日本大震災の復旧・復興活動で顕在化した視点として、がれき等の災害廃棄物(コンクリート塊、土石、木材、ゴム、金属類、木など)でもコンクリート構成材料として製造者により製品製造に向けた品質管理が適切になされ、完成した製品が有用物となり得れば、①がれき残渣の保管場所の縮減(土地)、②最終処分量・新規資材量の縮減(土地・資源)、③最終処分場の拡張・新設時間の確保とコスト縮減(土地・資源)など、土地利用と資源循環の双方に関わる環境インパクトを軽減できる新たな役割が具体的に示されたといえる。このような視点は、過去にLCA国家プロジェクトと連携して開発されたLIME(日本版被害算定型影響評価手法)においても具体的に示されており、実際にコンクリートの環境負荷評価に導入した事例⁸⁾もある。一方、コンクリート構造物の品質保証に関わる議論⁹⁾においては、コンクリート構造物が作り手・使い手全体で「健全性」を保つためには、「狭義の品質」として構造物の機能・性能を作り手が適切に品質管理をし保全する段階か

*1 工学院大学 建築学部建築学科 准教授・博士(工学) (正会員)

*2 鹿島技術研究所 建築生産グループ・博士(工学) 上席研究員 (正会員)

*3 BASF ジャパン株式会社 建設化学品事業部 (正会員)

*4 八洋コンサルタント 取締役・技術センター所長 (非会員)

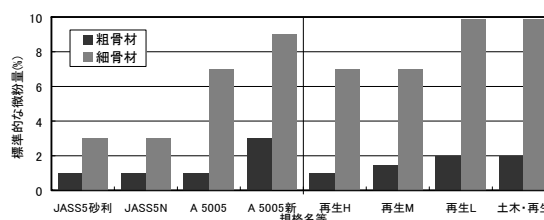
ら、「広義の品質」として使い手への信頼性・安全性を踏まえた上で、少なくとも設計耐用年数の全期間を通じ、使用者のニーズを損なわずかつ使用者への品質保証項目に対する要求水準を下回らないように適切に性能評価をし、社会的便益を持続させることが重視される。コンクリート構造物はその規模・用途により、土地利用や資源循環などを含めた資源環境保全性が使用者の広義の品質となり得るため、品質保証条件の一部に含まれる可能性がある。本研究は、このような観点からも研究目的や意義を位置づけている。

2.2 副産微粉の混和によるコンクリートの資源環境保全貢献度

図-1 にコンクリートに混和可能な微粉量に関する標準値比較を示す。日本工業規格、日本建築学会および土木学会の規格等におけるコンクリート用骨材に含まれる微粒分量に関して、一般にコンクリート用骨材の需要量は膨大なため、これらの規格等からも用途・種類を区別した上でコンクリートの物性に大きな影響がない範囲で微粒分を骨材量に対して10%程度混和する方向にあるといえ、特に再生骨材コンクリートに関して顕著といえる。また、1998年 JCI 規準「コンクリート用石灰石微粉末品質規格(案)」では、石灰石微粉末の混和により、石灰石微粉末とカルシウムアルミネートとの反応によるセメント初期水和の促進効果、温度ひび割れ低減のため結合材代替利用、吹き付けコン等の粉じん・はね返し防止のため粘性付与効果等⁶⁾が明示されている。更に近年の需要増は、乾燥収縮量の低減効果¹⁰⁾、完全循環型の材料選定によるセメント原料化⁵⁾、海外輸入不要の自給自足型鉱物などの長所を活かすが認識されている。そして JIS A 5005:2009 の改正では、微粒分の最大値が砕石 3.0%、砕砂 9.0%に、砕石の粒形判定実積率が 58%以上の場合には 5.0%にすることが認められた。

表-1 に副産微粉の混和による環境影響評価のフローを、図-2 に副産微粉の発展的利用による環境影響評価結果を示す。上記を鑑み、各種研究・統計資料等をもとに、副産微粉の発展的利用による a) 骨材使用量削減効果と b) 最終処分場延命効果を、ここでは将来の人口動態に比例してコンクリート需要が推移すると仮定し、実態調査に基づくコンクリート中の平均骨材容積割合を設定し、これに全骨材需要量の4%が廃棄微粉量となる条件(例:骨材4億tの場合1600万t)をもとに、JIS A 5005:2009 砕石・砕砂の最大微粉量を踏まえ、想定した廃棄微粉量から骨材混和微粉量を平均6%(3→9%)増加させる条件等を設定した上で、①～⑮の実態調査および推計条件の概要に従い簡易に推計した。結果、a) 骨材使用量削減効果については、2050

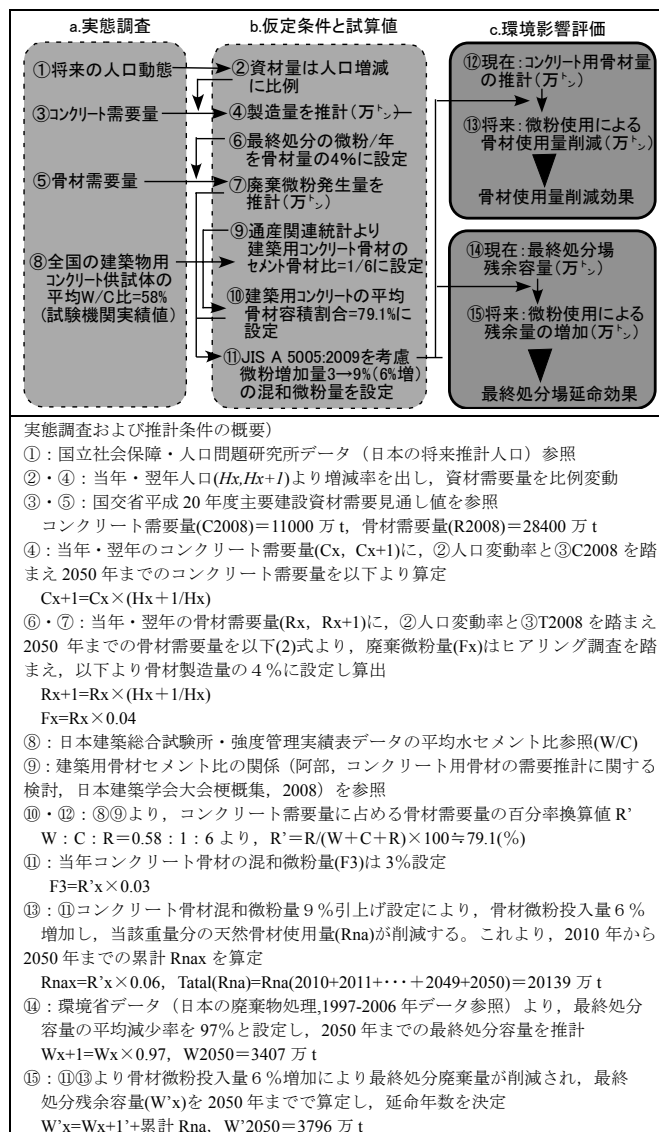
年までの40年間で骨材使用量は2億t程度削減でき、b) 最終処分場延命効果については、2年程度延命される可能性があることが示された。これらは土地利用と資源循環の観点からはコンクリート製造面での間接的な社会的便益、更には外部環境効果として認識することが可能であり、副産微粉の混和による資源環境保全への貢献度の評価要因となり得る。

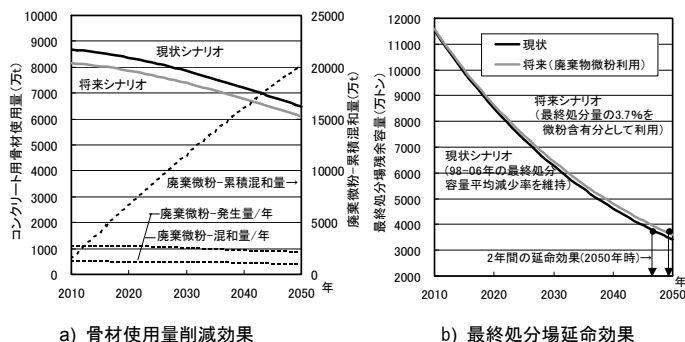


備考) JASS5 砕砂: 日本建築学会建築工事標準仕様書・同解説 鉄筋コンクリート工事 2009 コンクリートの材料(砂利・砂の品質) / JASS5N: JASS5 原子力発電施設版/A 5005: JIS A 5005-2000 コンクリート用砕石及び砕砂/A 5005 新: JIS A 5005-2009 版/再生 H: JIS A 5021 再生骨材 H/再生 M: JIS A 5022 再生骨材 M/再生 L: JIS A 5023 再生骨材 L/土木・再生: 電力施設解体コンクリートを用いた再生骨材コンクリート設計施工指針(案)

図-1 コンクリートに混和可能な微粉量に関わる標準値比較

表-1 副産微粉の混和による環境影響評価のフロー





図－2 副産微粉の発展的利用による環境影響評価

2.3 二次副産材の混和によるコンクリートの基礎的物性への影響

(1) 使用材料および実験方法

表－2に使用材料，表－3に実験要因と水準，表－4に実験項目と方法，表－5にコンクリートの計画調合を示す。使用材料は研究目的にある資源環境保全への貢献性を重視し，現況での需要要求が高く人工骨材・再生材微粉などの二次副産材を積極利用した上で調合上の化学組成を単純化し完全循環型の組成に近づけることを前提に，同一産地・種類型で材料構成されるファミリー型の材料選定とした。セメントは普通ポルトランドセメント(OPC)に副産微粉であるフライアッシュ(FA)を質量比15%混和しFB種と同等となるものとし，硬質砂岩系材料(B)，石灰石系材料(L・N)および再生骨材系材料(R)の4種類について，ファミリー間の特徴を評価することを目的に水セメント比55%一定の条件下で粗骨材かさ容積を一定(0.55)，単位水量170～185kg/m³迄の3水準(S,M,L)，微粉量を細骨材質量比に対する9%上限となる4水準等(P1:1.0～P9:9.0%)の条件を設け，計12種類を基本とする供試体を作製した。またエネルギー分散型蛍光X線分析により各種試料の化学組成を分析し，調合後のコンクリートの化学組成を推計しその特徴を考察した。

(2) 各種ファミリー型の化学組成

図－3に各種ファミリー型コンクリートの化学組成を示す。本研究では資源環境保全性を重視することから，地球全体および国内一般の地殻構成元素との比較の視点も重要になる。a)大陸地殻の推定値は，一般的なリファレンスブック等でクラーク数をもとに算定される値で，地球における火成岩，変成岩，堆積岩などの基本的な組

表－3 実験要因と水準

要因	水準
水セメント比	0.55 一定
単位水量(kg/m ³)	170(S), 175(M), 185(L)
単位粗骨材かさ容積	0.55 一定
微粉量 ^{*1}	1, 3, 6, 9 (%)
細骨材洗浄	有, 無
化学混和剤量 ^{*2}	C×0～2.0%

*1 微粉量は，各ファミリー(B, L+N, R)=(1%, 3～9%, 3～9%)に設定

*2 AE減水剤を使用。空気量調整剤は目標空気量に合わせて調整

表－2 使用材料

材料	記号	種類	内容
セメント	OPC	フライアッシュセメント B種同等品	OPC : FA=85 : 15 混合，密度 3.04g/cm ³
a) 微粉	B	陸砂微粉	密度 2.58g/cm ³
	L	石灰石微粉	密度 2.71，比表 3370cm ² /g
	N	石灰石微粉	密度 2.72，比表 3410cm ² /g
	R	再生微粉	密度 2.50g/cm ³
b) 細骨材	B	陸砂	表密 2.58，吸水率 2.21%，微粉 1.3%
	L	石灰石砕砂	表密 2.66，吸水率 1.13%，微粉 2.9%
	N	石灰石砕砂	表密 2.66，吸水率 1.33，微粉 3.7%
	R	再生砕砂	表密 2.52，吸水率 4.20，微粉 0.7%
b) 粗骨材	B	砂岩碎石	表密 2.67，実積率 62.9，微粉 0.1%
	L	石灰石碎石	表密 2.70，実積率 60.5，微粉 0.3%
	N	石灰石碎石	表密 2.71，実積率 59.9，微粉 0.3%
	R	再生碎石	表密 2.59，実積率 6.15，微粉 0.1%

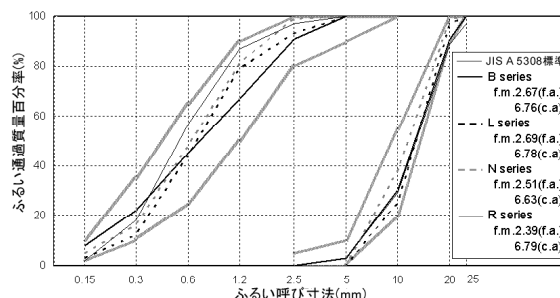
(備考) FA : フライアッシュ，表密 : 表乾密度(g/cm³)，f.m 粗粒率 : 図 c) に記載，B 微粉 : 骨材付着分



a) 微粉 (R 再生微粉，L 石灰石微粉，N 石灰石微粉)



b) 骨材 (B 陸砂，B 砂岩碎石，L 石灰石碎石，R 再生粗骨材)



c) 骨材の粒度分布曲線および粗粒率

表－4 実験項目と方法

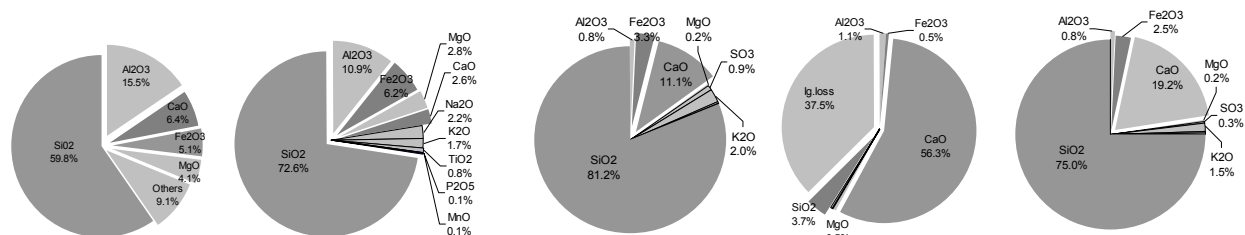
対象	試験項目	方法ほか
全試料	蛍光 X 線分析	エネルギー分散型，酸化物組成定量分析
微粉	密度／比表面積	定容積膨張法／BET 比表面積
骨材	密度・吸水率	JIS A 1109, JIS A 1110
	微粒分量試験	JIS A 1103
	単位容積質量・実積率	JIS A 1104
モルタル コンクリート	スランプ・フロー試験	JIS A 1101 JIS A 1150
	空気量	JIS A 1128
	ブリージング	JIS A 1123

(備考) 蛍光 X 線分析の同定値 (評価因子 : SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, MgO, SO₃, K₂O, 他 : TiO₂, MnO, MgO) より主要因子比を図－3に反映した

表－5 コンクリートの計画調合

種類	W/C (%)	微粉 (%)	s/a (%)	質量(kg/m ³)				
				水	セメント	微粉	細骨材	粗骨材
標準B		1	49.3	S:170	S:309	P1:9.1	825	B:924
石灰	55	3	～	M:175	M:318	～	～	L:899
L,N		6	51.7	L:185	L:336	P9:84.5	910	N:892
再生R		9						R:875

(備考) 設定空気量 4.5±1.5%，設定スランプ値 18±2.5cm，単位粗骨材かさ容積 0.55，FA 含有量 C×15.0(%)，粗骨材微粉はファミリー差が微小なため骨材重量に含める



a)大陸地殻の推定値 b)国内河川砂利・砂の推定平均値 c)砂岩系Bシリーズ d)石灰系Lシリーズ e)再生系Rシリーズ

図-3 各種ファミリー型コンクリートの化学組成

成を構成するものとなり、SiO₂が60%程度、Al₂O₃が15%程度、Fe₂O₃、CaO、MgOが各々5%程度を占める。b)国内河川砂利・砂の推定値は、地球化学図¹¹⁾の全国河川岩石化学組成データベースをもとにその他要素を珪酸塩岩系酸化物として算出した値であり、国内の地殻は堆積岩系の土壌の影響が考えられ、SiO₂が72%程度まで増大している。これらに対し、c)砂岩系Bシリーズは、砂岩系骨材で構成されるためSiO₂が多い組成となっている。d)石灰系Lシリーズは、CaOの割合が多く、次いで炭酸ガス固定分のIg.lossが多くを占めるが、これらは全量が再びセメント原料になる完全リサイクルコンクリートとして扱うことが可能となる。e)再生系Rシリーズは、セメント硬化体分の混和によりCaO分が増加しているが、今回の試料についてはSiO₂が多くを占め、原コンクリートの組成および破碎処理に依存するものとなる。

(3) モルタルのフレッシュ性状への影響

図-4に微粉量の影響を考慮した余剰ペースト量の概念図を、図-5に微粉量・余剰ペースト量とモルタルフレッシュ性状を示す。なお一般に、粉体量の増加によりコンクリートの粘性が増大する影響の検討が必要であるが、ここでは前述した目的に従い、微粉量混和によるモルタルのフレッシュ性状への影響を検討するため、モルタル中の細骨材を除いた全ペースト容積V_pと微粉の絶対容積V_{pa}の和から、充填ペースト部分(V_{s'}-V_{s'}G)を差し引き求められる微粉入り余剰ペーストV_{ep}に着目し評価を行った。

図-5a)における0打フロー値と微粉量の関係では、化学混和剤量を0.5%から1.0%に増加させたBシリーズはフロー値が容易に増加した。一方、Lシリーズは化学混和剤量が同等の1.0%の場合でもフロー値が増加する効果が得られなかったが、微粉量を3%から9%に増加させることで同程度のフロー値を得ることができた。また、b)における0打フロー値と余剰ペースト量の関係では、B・Lシリーズともに、モルタルに含まれる微粉入り余剰ペースト量の割合が多いほどフロー値の増大が確認できた。以上より、既往の研究と同様に、微粉を混和することによりフロー値を増大させる積極的な効果が得られ、それらはモルタル状態

でも考慮することができる。また、微粉と骨材の種類により余剰ペースト量に対応した0打フロー値の増加傾向が相違することから、微粒分種類の影響を踏まえる必要がある。

(4) コンクリートのフレッシュ性状への影響

表-6にコンクリートのフレッシュ性状を、図-6にコンクリートのフレッシュ性状への各種影響を示す。コンクリートの練り混ぜは、JIS A 1138 試験室におけるコンクリートの作り方に準じ、強制2軸ミキサーを用い、細骨材、セメント、細骨材の順に投入し、10秒攪拌後、水と化学混和剤を投入して30秒練り、粗骨材を投入して60秒練り後に製造し、設定した空気量・スランプが得られた試料について、ブリージング量等のフレッシュ性状を評価した。先のモルタル実験を踏まえると今回の調査ではファミリー化した材料選定により、骨材種類・微粉量がスランプ値をはじめブリージング量などフレッシュ性状に与える影響が増大する可能性も考えられた。

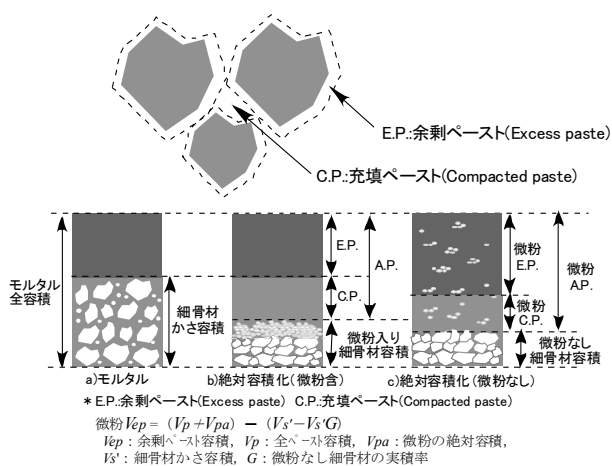
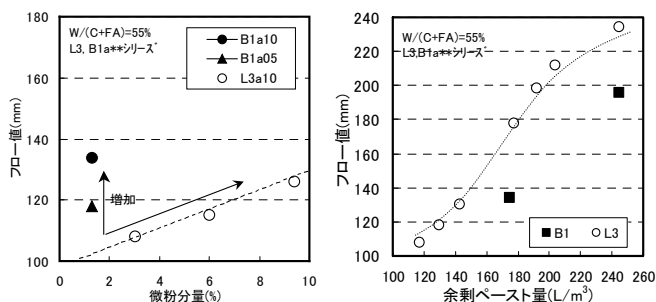


図-4 微粉量の影響を考慮した余剰ペースト量の概念図



a) 0打フロー値と微粉量 b) 0打フロー値と余剰ペースト量

図-5 微粉量・余剰ペースト量とモルタルフレッシュ性状

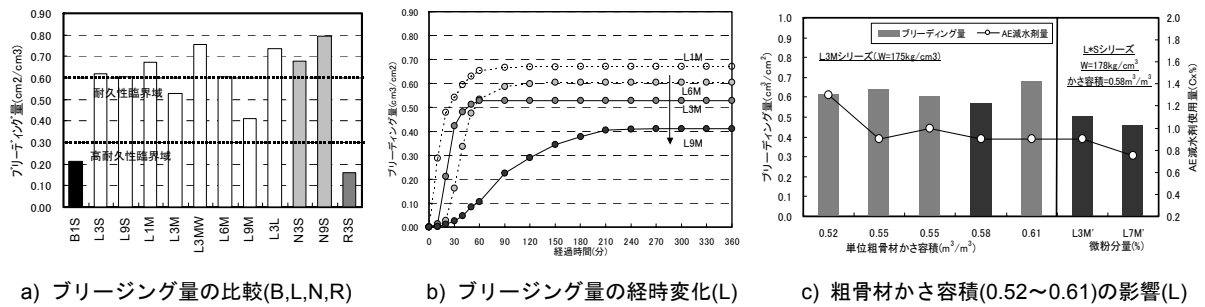


図-6 コンクリートのフレッシュ性状への各種影響

図-6 a)のブリージング量の比較(B,L,N,R)では、B と R が全体に低い値で推移するのに対し、L については相対的に値が増大し、旧高級コンクリート品質区分における許容値¹²⁾0.3cm³/cm²を越えてブリージングが生じる場合があるが、微粉量の混和程度により低減できることが確認された。従って、b)ブリージング量の経時変化(L)では、微粉量を1～9%まで段階的に変化させたところ、ブリージングの開始時間は同様でも9%程度まで混和すると上昇水の排出速度と最終排出量が大きく低減する。またc)より、粗骨材かさ容積(0.52～0.58)の区間においては、ブリージングの発生要因となるモルタル部分の絶対容積が減少、ブリージング水の滞留要素となる粗骨材下部の絶対容積が増大する影響により、粗骨材量との関係からブリージング発生量に頭打ちがある状態の存在が示唆された。なお、図-7のコンクリートの余剰ペースト量との関係より、一定のスランプを得るために余剰ペースト量を増加させると化学混和剤使用量も削減できるが、ブリージング量に及ぼす影響は小さくなることから、粗骨材の存在がブリージング量に関与したことが示唆される。

図-8に単位粗骨材かさ容積がブリージング量に及ぼす影響を示す。粗骨材混入による影響を評価するため、粗骨材の種類およびかさ容積を0, 0.275, 0.55の3段階に区別してブリージング量を測定した。これより、BおよびLシリーズ双方において種類により程度に差はあるものの骨材量の増加に伴いブリージング量が低減することが確認された。続いて、図-9に粗骨材下のブリージング空隙量増加率を、a)単位粗骨材ブリージング界面空隙率の概念図、b)単位粗骨材量ごとの空隙率により示す。ここで示す単位粗骨材ブリージング界面空隙量は、式(1)により、コンクリート中の粗骨材絶対容積に占めるブリージングにより発生した粗骨材下のブリージング空隙量の割合を示す。これより今回の実験範囲では、単位粗骨材ブリージング界面空隙量は粗骨材量の増加に比例して値が増加する。つまり、粗骨材界面下の空隙量が一定範囲で増加することが推察された。そして、Bと比較してLシリーズの方

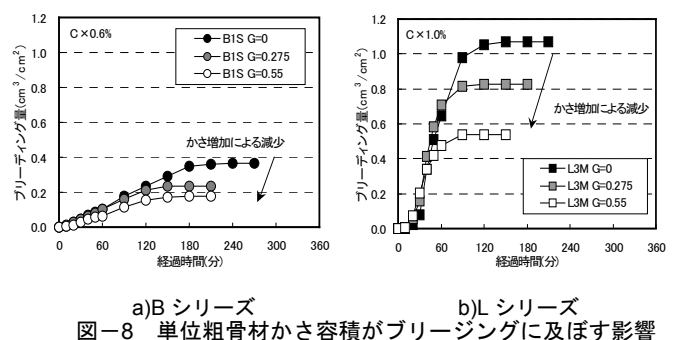
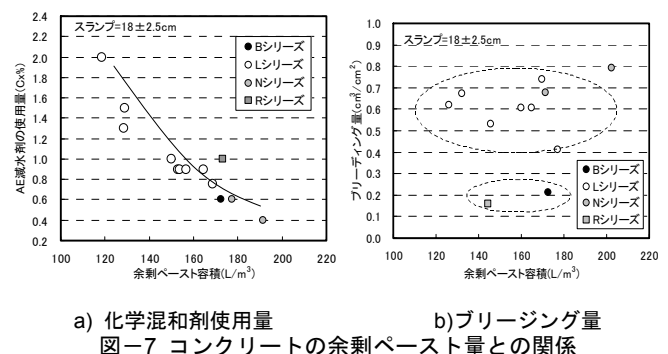
がその傾向が強くでていることから、ファミリー型の調査種類により、粗骨材界面下に生じるブリージング量に対して影響を及ぼす可能性が示唆された。なお、微粉量が増加することでこの状況を緩和させる可能性も同時に示されているため、微粉を混和することによるフレッシュ性状改善策として位置づけることが可能である。

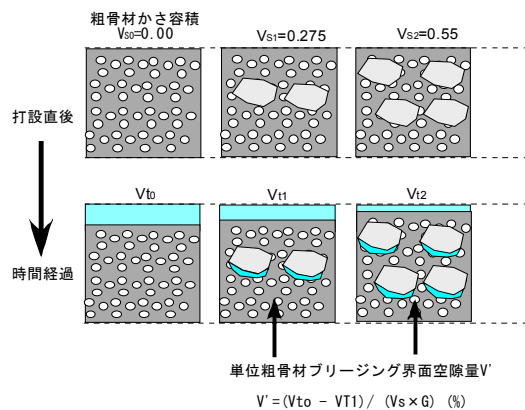
$$V' = (V_{to} - V_{t1}) / (V_s \times G) \quad (\%) \quad (1)$$

ここに、 V_{to} ：粗骨材がない場合のブリージング率(%),
 V_{t1} ：粗骨材がある状態での時間 T_1 後のブリージング率(%),
 V_s ：単位粗骨材かさ容積, G ：粗骨材実積率(%)

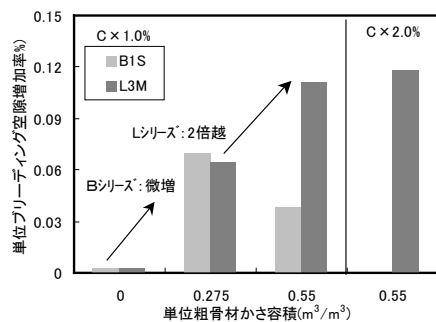
表-6 コンクリートのフレッシュ性状

種類 (種類・微粉量・水量)		微粉量 (%)	単位 水量 (kg/m ³)	スランp (cm)	p ^o リーz ^h ンq ^o 量 (cm ³ /cm ²)	余剰ペースト量 (L/m ³)
砂岩系		B1S	1	170	0.21	172.5
石灰系		L3S	3	170	0.62	126.0
		L9S	9	170	0.60	164.8
		L1M	1	175	0.67	132.1
		L3M	3	175	0.53	145.7
		L6M	6	175	0.60	160.1
		L9M	9	175	0.41	177.3
		L3L	3	185	0.74	170.0
		N3S	3	170	0.68	171.3
		N9S	9	170	0.79	202.4
再生系		R3S	3	170	0.16	144.6





a) 単位粗骨材ブリージング界面空隙率の概念図



b) 単位粗骨材量ごとの空隙率

図－9 粗骨材下のブリージング空隙量増加率

3. まとめ

本研究により、以下の知見が得られた。

- 1) 資源環境や土地利用などのコンクリート製造に関わる資源環境の保全性に向けて、副産微粉を積極利用し、同一産地・種類型の材料選定により得たコンクリートについて、混和する骨材微粉量を9%に増加しコンクリートの製造を40年程度継続することで2年程度の最終処分場の延命効果が期待できる。
- 2) 同一産地・種類型の材料選定により製造したモルタルおよびコンクリートのフレッシュ性状について、細骨材に含有する微粉量を9%まで増加させることで、微粉量に依存する余剰ペースト量によるフロー値の改善効果が得られる。
- 3) 同一産地・種類型の材料選定および単位粗骨材かさ容積量により、Lシリーズについては各種材料の物

理化学的な特性に起因するコンクリートのブリージング量への影響が確認されたが、微粉量の混和により改善できる可能が示唆された。

参考文献

- 1) 日本建築学会：環境配慮施工指針(案)・同解説，2008
- 2) コンクリート用骨材の現状，コンクリート工学，Vol.46, No.5，2008
- 3) 田村雅紀：首都圏に流入する骨材の輸送時環境負荷，セメント技術大会講演集,2008
- 4) 経済産業省：カーボンフットプリント制度の実用化・普及推進研究会，経済産業省 Website，2009
- 5) 田村雅紀,野口貴文,友澤史紀：セメント回収型完全リサイクルコンクリートの完全リサイクル住宅への実施工検討，日本建築学会技術報告集，第21号,2005
- 6) JCI 規準：コンクリート用石灰石微粉末品質規格(案),1998
- 7) セメント協会：コンクリート塊から発生する微粉末の有効利用，1996
- 8) コンクリート技術シリーズ62：コンクリートの環境負荷評価（その2），2004
- 9) 日本コンクリート工学会：微破壊試験を活用したコンクリート構造物の健全性診断手法調査研究委員会報告書，2012
- 10) 日本建築学会：収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説，2006
- 11) 産業技術総合研究所：日本の地球化学図，2004
- 12) 日本建築学会：鉄筋コンクリート工事の現状と今後の課題，建築雑誌9月号，pp.931-935，1972

謝辞

本研究の実施にあたり、原田健二氏（当時 BASF ポゾリス）、浅見正雄氏（当時工学院大学卒論生）より多大な助力を得た。また本研究は、日本建築学会・原子力発電所 RC 工事研究小委員会・基礎研究 WG，工学院大学 UDM・PJ 研究, H24 年度科研費(若手 A:23680681 田村雅紀)の一部であり、深謝の意を表する。