

論文 副産微粉を同種材料に混和したコンクリートの耐久性状

田村 雅紀*¹・依田 和久*²・大島 正記*³・斉藤 順一*⁴

要旨：平常時の建設活動における資源環境への配慮が一般化しつつある中で、東日本大震災を契機に、災害廃棄物を含めた資源環境の保全性を確保する必要性が問われつつある。本研究では、建設活動における資源循環の仕組みの中で大量に発生する副産微粉を積極的に使用した上で、副産微粉と同一種類・産地型の骨材を用いて得られる各種ファミリー型コンクリートを製造し、中性化抵抗性と乾燥収縮抵抗性を中心とした耐久性への影響を実験的に評価し、今後の資源保全性の確保に資するコンクリート材料の発展的利用のあり方を検討した。

キーワード：骨材資源、資源環境、再生材料、副産微粉、耐久性状

1. はじめに

現在、既存ストックから発生するコンクリート系解体材は1億t弱であり、2055年前後には4億t程度の排出が想定される。その状況で、首都圏では2020年開催の東京オリンピック・パラリンピックに向けてインフラが整中であり、新設以外の既存構造物の改修も加え、防災と環境に対応した建設工事の実施が検討されている。日本建築学会では2008年までに制定された再生骨材JISを踏まえ、2014年に再生骨材を用いるコンクリートの設計・製造・施工指針(案)を策定し、実質的な再生骨材コンクリートの利用促進をより一層期待できる状況となったが、発注者への品質信頼性や、最終処分場確保の課題が切迫する中で各種副産材料や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。また、コンクリートの最大需要地である首都圏では、骨材採取地が偏在した状況を鑑み¹⁾、天然材や再生材を利用する中で副産微粉等の利用促進^{2),3)}や、完全循環型の材料選定の適用⁴⁾、更には低炭素技術を推進する観点から輸送負荷の低減を図ることなど、総合的な建設資材の利用のあり方について同時に模索する必要がある。

一方、東日本大震災の復旧・復興活動を通じ、がれき等の災害廃棄物に含まれたコンクリートや、廃木材などの処理問題が顕在化した。これら災害がれきを用いてコンクリート用材料を含む再生材として積極活用した結果、がれきを含む最終処分量・新規資材量の縮減など、土地利用と資源循環の双方に関係する環境負荷を軽減させる新たな役割も明示されたといえよう。

以上を踏まえ、本研究では、災害時を含むコンクリートの品質と資源環境保全の確保を目的に、資源循環の仕組みの中で大量に発生する砕石粉や再生骨材微粉などの副産微粉を積極利用し、その副産微粉と同一産地・同一種類型(以下、ファミリー型とする)の骨材を用いて得

られる同種の副産材を混和した各種コンクリートを製造する。それらのフレッシュ性状や基礎力学特性に関わる検討^{5),6)}を踏まえ、耐久性状に関する実験的検討を行い、今後の資源保全性の確保に資するコンクリート材料の発展的利用のあり方を検討した。

2. 研究概要

2.1 使用材料

表-1に使用材料、表-2に実験要因と水準、表-3に実験項目と方法、表-4にコンクリートの計画調合を示す。使用材料は資源環境の保全性に配慮し、同一産地・同一種類型で構成されるファミリー型の材料選定とした。セメントは普通セメント(OPC)に副産微粉のフライアッシュ(FA)を質量比で15%混和したFB種同等品とし、骨材は物性評価の標準とする砂岩系(Bファミリー)、石灰系(L・Nファミリー)および再生系(Rファミリー)の4種類とした。調査は、水セメント比55%一定、粗骨材かさ容積を一定(0.55)、単位水量170~185kg/m³を3水準(S,M,L)、細骨材質量比に対する微粉分を4水準等(P1:1.0~P9:9.0%)を設け、計12種類の供試体を作製した。骨材表面微粉の影響を評価した石灰石砕砂Lは攪拌水洗で微粉除去をした。また、既往研究^{5),6)}より、エネルギー分散型蛍光X線分析による各材料の化学組成を分析し、コンクリート全体の化学組成を推定したところ、砂岩系Bファミリーは砂岩系骨材で構成されるためSiO₂(81.2%)、CaO(11.1%)が多くなる一方、石灰系LファミリーはCaO(56.3%)とig.loss(37.5%-CO₂)が多く、全量が再生セメント原料と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。再生系RファミリーはSiO₂(75.9%)とセメント硬化体によるCaO(19.2%)が多く、原コンクリートの組成が影響した性質を有した。

2.2 コンクリートのフレッシュ性状と基礎力学特性

コンクリートに混和可能な微粉量の関して、各種のJIS

*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 鹿島建設(株) 技術研究所建築生産グループ 上席研究員 博士(工学) (正会員)

*3 BASF ジャパン(株) 建設化学品事業部 (正会員)

*4 (株)八洋コンサルタント 技術センター 所長 (非会員)

材齢 4 週まで水中養生とし、温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $60 \pm 5\%$ の恒温恒湿室で材齢 8 週まで静置した。その後、 CO_2 濃度 $5 \pm 0.2\%$ の中性化促進試験装置に供し、JIS A 1152 に従い促進材齢 1 週～13 週までの中性化深さを測定した。

本研究では、今後、骨材採取地の偏在化や副産材の積極使用が求められる社会環境となった場合、結果としてファミリー型の材料使用が増加すれば、既報⁵⁾のフレッシュ性状や力学特性と同様に、中性化抵抗性に関してもファミリー型の材料構成に起因する物性影響が生じると考えられ、実験的に評価を行った。骨材種類の影響(B・R・L ファミリー)は、単位水量が小 ($S: 170\text{kg/m}^3$) かつ微粉量が小 ($1 \sim 3\%$) の条件を基本とし、L は微粉量 9% の場合も含めてファミリー間の物性の違いを評価した。

実験の結果、B・R ファミリーは同程度の中性化深さと中性化速度係数を有していた。本実験の範囲において、同一の単位水量・水セメント比・単位粗骨材かさ容積であれば、再生粗・細骨材 M を全量使用した場合でも、B ファミリーと同等の中性化抵抗性を有するといえる。また L ファミリーで微粉量が 3% である L3S は、B・R ファミリーの 40～45% 程度の中性化深さと中性化速度係数であり、大幅に中性化抵抗性が向上した。これは既報⁶⁾における各種コンクリートの力学特性に関して、石灰石骨材の L・N ファミリーは、B ファミリーに対して 120% 以上の高い力学特性を有し、石灰石骨材界面における遷移帯組織の緻密化や石灰石微粉とカルシウムアルミネート系水和物による初期水和硬化などの現象⁷⁾が関与したと考えられ、中性化抵抗性が向上した要因になったと推察される。なお、L ファミリーで微粉量 9% を混和した場合は、B・R ファミリーの 75% 程度の中性化深さと中性化速度係数となり同様の効果は確認されたが、微粉量 3% の場合よりも中性化抵抗性が向上する程度は低下した。微粉量の違いにより、セメント硬化体の組織形成に関係しない余剰の微粉は、硬化体組織内で物理的な空隙を生じさせるように分散し⁷⁾、結果として全空隙量が増加した組織構成になると考えられる。この時、セメント硬化体における空隙内水分と空隙周辺の水和物間に生じる吸着力に伴う収縮現象が大きく影響しない、比較的大径の自由水空隙が増加すれば、結果として蒸発性水分量が多くなり、炭酸化も進行しやすくなる可能性がある。

(2) 水分逸散と乾燥収縮抵抗性

中性化抵抗性と同様に、ファミリー型の材料構成に起因する乾燥収縮やその原因となる水分逸散現象の影響を関して実験的に評価した。

一般に、セメント硬化体内の微細空隙には、自由水空隙のほか毛細管空隙 ($5\text{nm} \sim 50\ \mu\text{m}$) やゲル空隙 ($1\text{nm} \sim 5\text{nm}$) が存在し、これらの空隙特性はセメント硬化体の力学特性や耐久性に影響を与える。この各種空隙の体積分布に

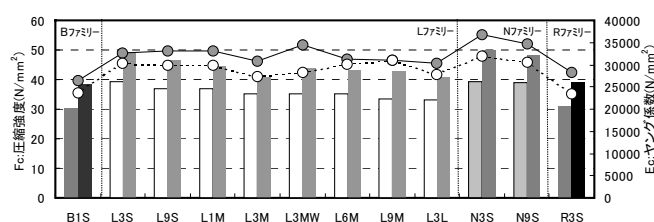


図-1 全ファミリー(B, L, N, R)の基礎力学特性

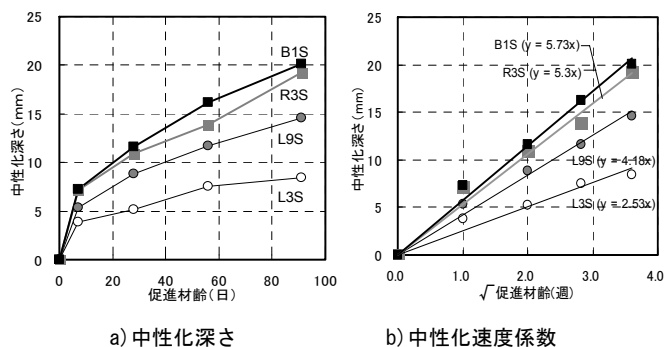


図-2 コンクリートの中性化抵抗性

より、乾燥条件下での水分逸散量は変化しコンクリートの乾燥収縮が生じる。既報⁶⁾の結果より、調合条件が同等であるファミリー型の材料使用により、B ファミリーに対する石灰系の L ファミリーのヤング係数は 124～138% 程度向上したことから、収縮現象に対しても L ファミリーにおける弾性的性質が向上した影響が生じる可能性がある。また余剰した微粉を含むセメント硬化体は、自由水空隙における蒸発性水分量が多くなる可能性があるが、これらの水分は蒸発に伴う空隙周辺のセメント硬化体組織を拘束しないため⁷⁾、乾燥収縮に影響を及ぼしにくいとされている。一方、毛細管空隙やゲル空隙は、自由水空隙と比較して、ゲルビン式に基づく気体分圧の低下により水分の凝集が生じる細孔量が増加することになる。この場合、セメント水和に影響を与える骨材種類や微粉量の違いにより、水分凝集が生じやすい空隙の体積分布は相違することが考えられ、一定の微細空隙では水空隙化が進み、非蒸発性水分が増加すると考えられる。結果、これら水空隙を形成する物理吸着水が乾燥に伴い逐次蒸発・移動して生じる駆動力は、乾燥収縮ひずみを生じさせることから、蒸発性水分(EWV: Evaporated Water Void)を含む空隙の水分逸散は乾燥収縮への影響は小さく、非蒸発性水分(Non-EWV)を含む空隙の乾燥化は収縮への影響が大きくなる点を踏まえた検討が必要となる。

上記を踏まえ、長さ変化率試験は、JIS A 1129-3 ダイヤルゲージ法で行った。角柱供試体 ($100 \times 100 \times 400\text{mm}$) を打設後 1 日で脱型、基長を測定し、温度 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 、湿度 $60 \pm 5\%$ の恒温恒湿室にて静置、1 週目～1 年間で測定した。なお、日本建築学会・乾燥収縮ひずみ予測式を式(1)に示す。これはセメント、粗骨材、混和材の違いなどを踏まえた実測値をもとに乾燥収縮ひずみの予測を可能としたもので

あるため、本研究では細骨材の影響を考慮することはできないが、ファミリー型の材料使用による一定の傾向が評価可能と考え、併記した。

$$\varepsilon_{sh}(t, t_0) = k \times t_0^{-0.08} \times \left\{ 1 - \left(\frac{h}{100} \right)^3 \right\} \times \left(\frac{(t - t_0)}{0.16 \times (V/S)^{1.8} + (t - t_0)} \right)^{1.4 \times (V/S)^{-0.18}} \quad \text{---(1)}$$

$$k = (11 \times W - 1.0 \times C - 0.82 \times G + 404) \times \gamma_1 \times \gamma_2 \times \gamma_3$$

骨材補正係数 γ_1 (B, L, R) = (1.0, 0.7, 1.4)

セメント補正係数 γ_2 (B, L, R) = (0.9, 0.9, 0.9)

混和材補正係数 γ_3 (B, L, R) = (1.0, 1.0, 1.0)

図-3 にコンクリートの乾燥収縮と骨材種類の影響 (L・B・R : S) を a)長さ変化率, b)質量変化率, c)水分逸散に伴う乾燥収縮ひずみ勾配の変化の順に示す。

a)長さ変化率は, R3S, B1S, L3S の順に収縮量が大きく, 石灰系 L ファミリーは, B・Rファミリーに対して1年経過した時点で 500 μ 程度(50%程度)収縮量が小さくなった。砂岩系 B に対する石灰系 L のヤング係数が 124~138%程度向上した点を踏まえると, 石灰石骨材の弾性係数が収縮抵抗に寄与したと考えられる。各ファミリーの長期的な収縮ひずみは, 10~20%程度の増減は生じたものの何れも予測式と対応する挙動を示し, ファミリー型の材料特性を評価できたといえるが, 厳密には細骨材の影響を加味する必要があるため, それは今後の課題とする。

b)質量変化率は, 長さ変化との相関があり, R3S, B1S, L3S の順に質量減少が顕著になり, 蒸発性・非蒸発性水分を含む一定空隙以上の水分逸散の影響が確認された。

c)水分逸散に伴う乾燥収縮ひずみ勾配の変化は, R3S, B1S は, 水分逸散率 0~2%までは緩勾配, 2~4%程度までは急勾配となり, L3S は, 緩・急勾配部分も同様の傾きであるものの, 水分逸散率が 50%程度に抑えられた相似形の曲線履歴となった。水分逸散特性と関係づけた空隙分布量の実測は容易ではないが, いずれも微粉量が最も少ない種類であるため, 蒸発性水分の粗大空隙と非蒸発性水分の微細空隙の割合は各ファミリー同程度で, 絶対量は L3S が大幅に少なくなると考えられる。

図-4 にコンクリートの乾燥収縮と標準的な微粉混

和の影響 (L ファミリー : S) を示す。

a)長さ変化率は, 微粉量 9%の L9S が 3%の L3S よりも材齢 90 日前後の初期段階における収縮量は若干大きい, 材齢 150 日以後の収縮量はほぼ同等となった。微粉を分散混入させた場合, 乾燥収縮の初期段階における収縮ひずみを増加させる可能性が示された。

b)質量変化率は, 長さ変化率との相関が確認され, 微粉量の多い L9S, L3S の順に乾燥の初期段階における質量減少が顕著となり, L9S は微粉混和により粗大空隙が増加し, 蒸発性水分の増加の影響が考えられた。

c)水分逸散に伴う乾燥収縮ひずみ勾配の変化は, L9S は水分逸散が 0~2%程度, L3S は 0~1.5%程度まではともに緩勾配で以後は急勾配となり, 双方がほぼ同様の収縮勾配を有したが, 履歴の変局点となる蒸発性水分と非蒸発性水分との境界の発生が微粉を多く混和した L9S で遅延した。従って, L9S は蒸発性水分の粗大空隙量が増加している可能性があることと, 変局点からの曲線長さも若干増加していることから, 非蒸発性水分の微細空隙の割合も増加し, 全体として乾燥収縮ひずみが増大したと考えられる。

図-5 にコンクリートの乾燥収縮と積極的な微粉混和の影響 (L ファミリー : M) を示す。Mは本研究では一般的な単位水量の調合とし, 微粉分の混和も多様な手法で対応可能とするシリーズとした。

a)長さ変化率は, 微粉量 1~9%を混和した L1M から L9M までを比較すると, 微粉の減少に伴い乾燥期間 120 日までの初期段階における収縮ひずみが緩慢になる傾向がある。逆に微粉が多く分散混入することで初期段階の乾燥収縮ひずみが増加した。なお微粉が少ない L1M は, 測定 1 年まで徐々に収縮が生じ, 非蒸発性水分を含む空隙の乾燥が継続的に生じたと考えられる。

b)質量変化率は, 長さ変化率との相関が確認され, 微粉量の多い L9M, L6M における乾燥期間 120 日までの初期段階における質量減少が顕著となった。S シリーズと同様に, L9M, L6M に関しては微粉混和により粗大空隙が増

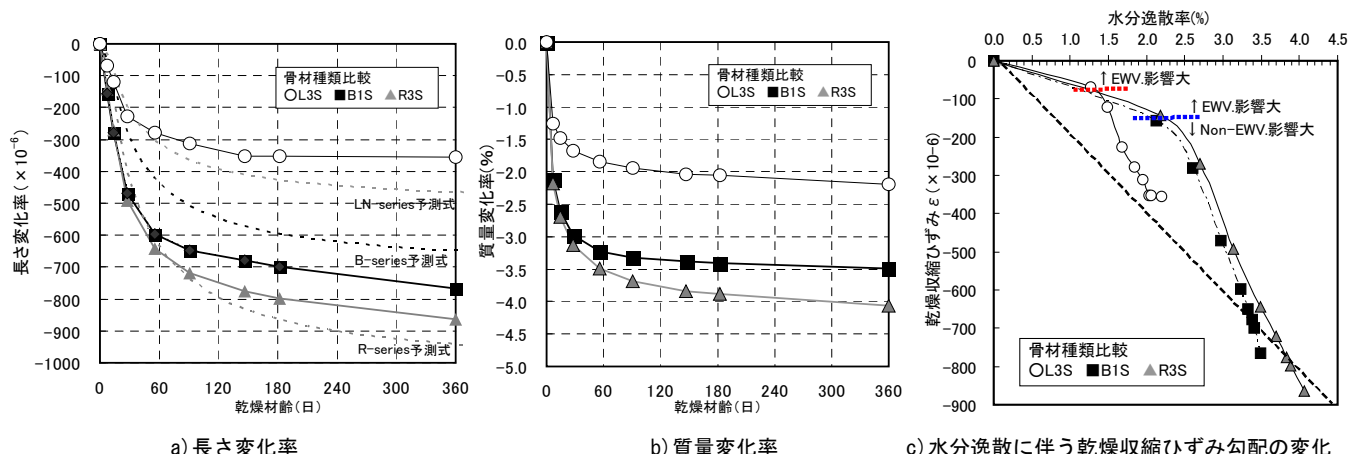


図-3 コンクリートの乾燥収縮と骨材種類の影響 (L・B・R ファミリー : S)

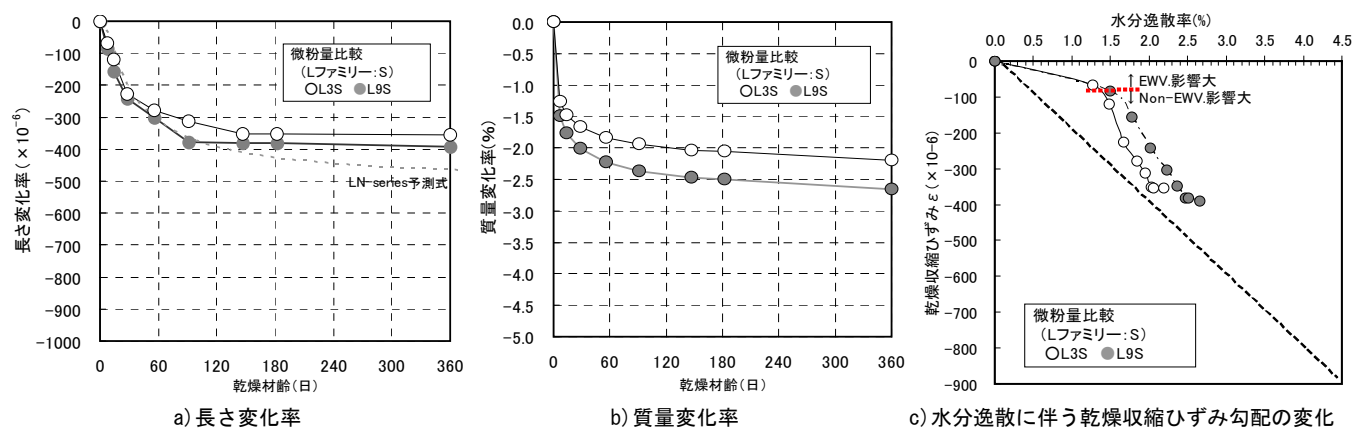


図-4 コンクリートの乾燥収縮と微粉混和の影響 (L ファミリー : S)

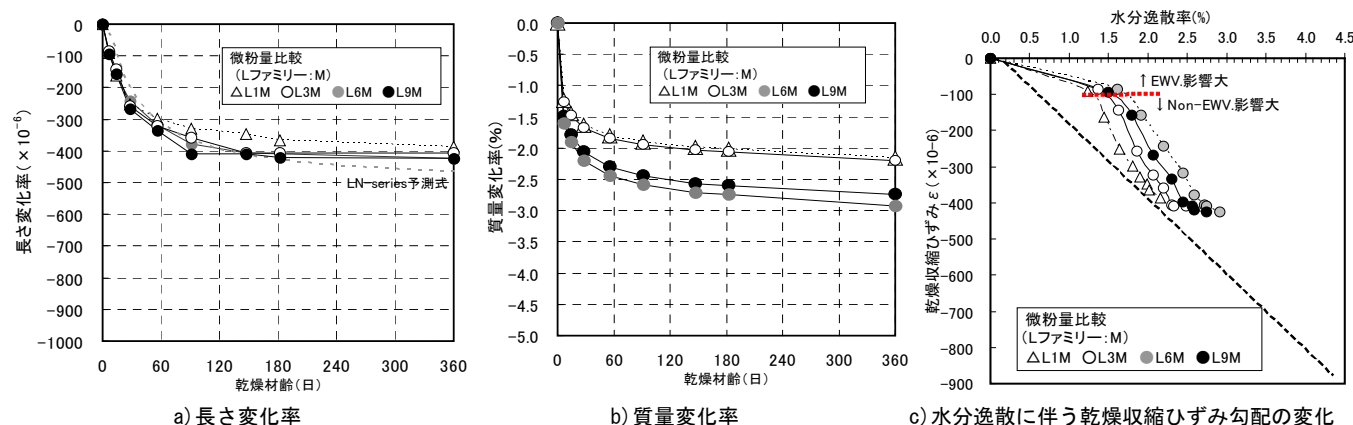


図-5 コンクリートの乾燥収縮と微粉混和の影響 (L ファミリー : M)

加し、蒸発性水分が増加したことが考えられた。

c)水分逸散に伴う乾燥収縮ひずみ勾配の変化は、L9Mは水分逸散率が0～1.6%程度、L1Mは0～1.2%程度まではともに緩勾配で以後は急勾配となった。また微粉量が多い場合、変局点以後の勾配が若干緩慢となり水分逸散率もわずかながら増加傾向が維持された。曲線履歴の変局点は、蒸発性・非蒸発性水分の影響の程度が変化する境界と考えられるが、微粉量に比例して境界の発生段階が遅延する状況が再確認され、L9MやL6Mは蒸発性水分の空隙が増加したと考えられる。変局点以後の曲線長さも微粉量に比例して若干増加する傾向にあり、微粉混和により非蒸発性水分の微細空隙割合も増加し、全体として乾燥収縮ひずみが増大した可能性が考えられる。

図-6にコンクリートの乾燥収縮と単位水量の影響 (Lファミリー: S・M・L)を示す。

a)長さ変化率は、一般のコンクリートにおける乾燥収縮の単位水量依存性に従い、L3S, L3M, L3Lの単位水量増加に比例する形で、乾燥期間150日までの初期段階に乾燥収縮ひずみが増加した。以後は初期段階における乾燥収縮ひずみ量を維持し、乾燥収縮ひずみ予測式と対応する挙動を示していた。

b)質量変化率は、長さ変化率との相関があり、L3L, L3M, L3Sの順に単位水量に依存して質量変化率が増大した。

c)水分逸散に伴う乾燥収縮ひずみ勾配の変化に関して

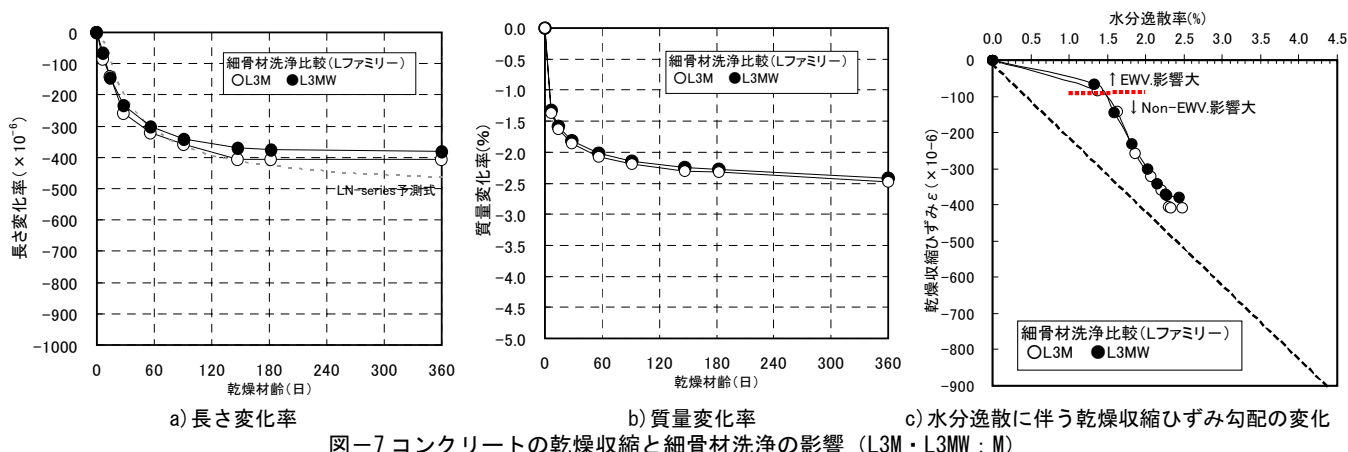
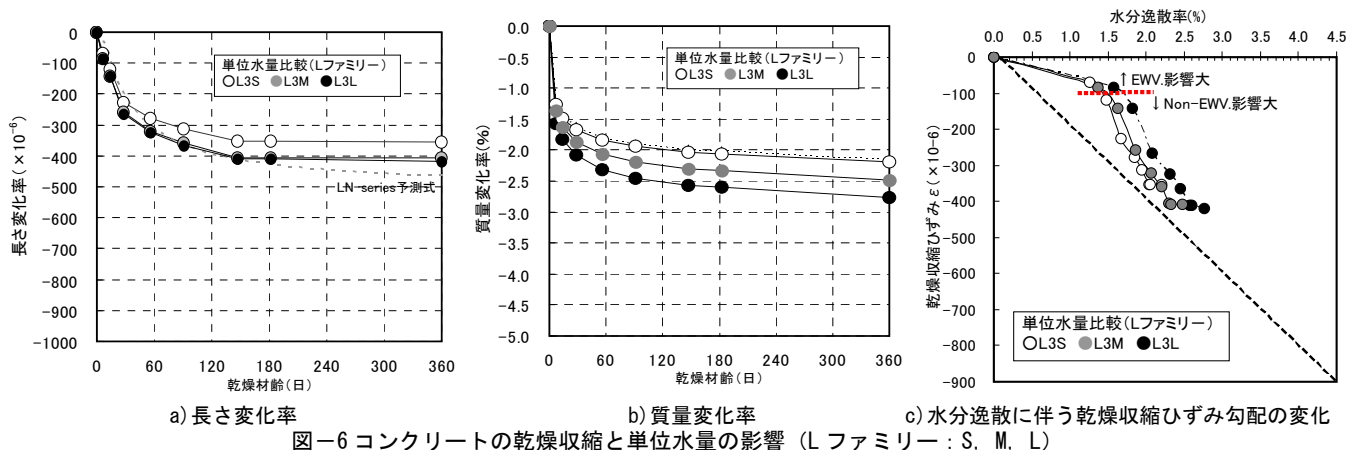
は、単位水量が大きいL3Lは水分逸散率が0～1.6%程度、L3M, L3Sは0～1.2%程度まではともに曲線履歴が緩勾配で以後は急勾配となるが、単位水量を問わず変局点以後の収縮勾配はほぼ同等であった。蒸発性・非蒸発性水分の影響の程度が変化する変局点は、単位水量の増加に比例して遅延したため、L3L, L3M, L3Sの順に蒸発性水分の割合が大きい粗大空隙量が増加したと考えられる。変局点以後の曲線長さも単位水量に比例して伸び、非蒸発性水分の微細空隙の割合も増加したと考えられ、全体としてL3L, L3M, L3Sの順に乾燥収縮ひずみが大きくなった。

図-7にコンクリートの乾燥収縮と細骨材洗浄の影響 (L3M・L3MW: M)を示す。石灰石骨材は、そのすりへり抵抗性の課題から、運搬等により骨材表面に付着する微粉分の適切な管理が必要になる。ここでは石灰石砕砂Lから微粉分を攪拌水洗し、コンクリート中の微粉が細骨材重量比3%となるように後添加しL3MWを製造し、骨材界面に付着した微粉の影響をL3Mと比較検討した。

a)長さ変化率は、細骨材洗浄のL3MWが全期間において若干の乾燥収縮量の低下が確認された。

b)質量変化率は、細骨材洗浄の影響はほぼ確認されず、石灰微粉による骨材界面の遷移帯組織の形成に影響は生じた可能性はあるもののセメントマトリックスに含まれる微粉量には差異はなく質量変化率は同等であった。

c)水分逸散に伴う乾燥収縮ひずみ勾配の変化も、水分逸



散率が 0～1.4%程度まではともに緩勾配でそれ以後は急勾配となり、変局点以後の収縮勾配および変局点以後の曲線長さもほぼ同等であった。以上、乾燥収縮に関しては細骨材洗浄の影響はほぼ確認されず、セメントマトリックス部分における使用材料の影響度が重要といえる。

3. まとめ

同一産地・種類型の材料を混和したファミリー型コンクリートに関して、中性化抵抗性と乾燥収縮特性を中心とした耐久性状を実験的に評価し、以下の知見が得られた。

- 1) 中性化抵抗性は、砂岩系 B に対し、再生骨材 M クラスの再生系 R は、材料構成が同等量である場合、中性化深さと中性化速度係数は同程度、石灰系 L は 40～45%程度まで抑えられる。なお石灰系 L で微粉量を 9%まで増加させた場合は、75%程度となり、微粉量混和に伴う一定の中性化抵抗性の向上効果が確認された。
- 2) 乾燥収縮特性は、砂岩系 B に対し、再生系 R は材料構成が同等量の場合、長さ変化率と質量減少率は同程度、石灰系 L は 50%程度まで抑えられる。石灰系 L は、コンクリートのヤング係数が増大した影響、微粉混和によるセメント硬化体内の自由水空隙における蒸発性水分と毛細管・ゲル空隙における非蒸発性水分の乾燥に伴う収縮ひずみの影響が関係し、ファミリー型の材料構成が耐久性状に影響する可能性が示唆された。

謝辞

本研究は、竹本油脂原田健二氏より助力を得て、H26 年度工学院大学 UDM 研究の一部として実施した。

参考文献

- 1) 田村雅紀, 阿部道彦: 首都圏に流入するコンクリート用骨材の需給動向調査と輸送時環境負荷評価, 日本建築学会技術報告集, pp.631-636, 第 31 号, 2009.9
- 2) 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 (建設副産物利用促進専門委員会報告), 1996
- 3) JCI 規準: コンクリート用石灰石微粉末品質規格(案), 1998
- 4) 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, pp.27-32, 第 21 号, 2005.6
- 5) 田村雅紀, 依田和久, 大島正記, 斎藤順一: 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, コンクリート工学年次論文集, pp.1927-1932, Vol.35, No.1, 2013.6
- 6) 田村雅紀, 依田和久, 大島正記, 斎藤順一: 副産微粉を混和したコンクリートの災害時を含む品質保証と力学特性への影響, 日本コンクリート工学会年次大会論文集, Vol.36, No.1, pp.2182-2184, 2014.7
- 7) 田代忠一(ほか): セメント・コンクリート研究会, セメント・コンクリート中の水の挙動, pp.207-208, 1993.10
- 8) 日本建築学会, 鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説, 2006.2