

コンクリートの中性化による体積変化におよぼす 粗骨材および試験体条件の影響

EFFECT OF COARSE AGGREGATE AND SPECIMEN CONDITIONS ON VOLUME CHANGE BY CARBONATION OF CONCRETE

大山優
Masaru OYAMA

Today's architecture with exposed surface concrete is common. However, when concrete is exposed to air, drying and carbonation occur. Carbonation causes shrinkage, which the effect of drying shrinkage would result in significant shrinkage damage. In this study, concrete specimens were prepared and accelerated carbonation tests were conducted. The main results were shown the relationship between water cement ratio of the concrete, unit water content, type of coarse aggregate, and the properties of the carbonation shrinkage depending on the conditions of the specimens.

Keywords: Concrete, Carbonation, Drying Shrinkage, Carbonation Shrinkage, Long Term,
コンクリート, 中性化, 乾燥収縮, 炭酸化収縮, 長期材齢

1 はじめに

1.1 研究の背景と目的

今日コンクリート仕上部が露出した建築や構造体は珍しくないが、気中に露出したコンクリートは乾燥による収縮や中性化が生じる可能性がある。これらの変化は、外気に対して空気が乾燥しやすくCO₂濃度も大きくなりやすい屋内でより生じやすい。コンクリートの中性化は、鉄筋保護の観点から問題視されることが多いが、コンクリート組織が炭酸化した際には収縮(炭酸化収縮)を生じる¹⁾。実環境ではコンクリートの中性化は短期間に進むものではないが、建築や構造体の長期の耐久性を考慮すると、乾燥収縮と合わせかなり大きな収縮を生じる可能性がある。

そこで本研究では、コンクリート試験体を作製し促進中性化試験を行うことでコンクリートの炭酸化収縮について検討した。単位水量や骨材の種類、促進中性化試験におけるシールの有無についても検討を試みた。また、実際に長期間保存されていたコンクリート試験体について測定を行い、促進環境と比較を行った。

1.2 既往の研究

コンクリートの乾燥収縮については数多くの研究があり、その機構についてもコンクリートの細孔径および細孔量と質量変化との関係で説明がなされている。硬化したコンクリートは内部に様々な大

さの細孔を持っているが、乾燥収縮に影響を与える細孔は0.1μm程度の毛細管空隙といわれている。毛細管空隙内の水分が逸散する際にメナスカスを形成し、細孔内に張力を発生させるために収縮が生じるとされる²⁾。

一方で、炭酸化収縮はセメントの水和物であるC-S-H(3CaO・2SiO₂・4H₂Oなど様でないためC-S-Hと表記される)がCO₂との化学反応で分解されることで収縮が生じるとされる³⁾。乾燥収縮がセメントペーストだけでなく粗骨材の乾燥収縮やヤング係数などが複合的に関わる現象であるのに対し、炭酸化収縮はセメントペーストとCO₂の反応がほぼすべてであり、セメントペースト硬化体やモルタルバーを用いた研究が多く、コンクリートを用いた研究はあまりない。このときの化学反応式の一例を式①および②に示す。なお、炭酸化収縮はコンクリートだけでなく、同じセメント系建材である窯業系サイディングやALCでも生じることが報告されている⁴⁾⁵⁾。



2 コンクリートの実験概要

2.1 実験の流れ

図1に研究の流れ、表1に実験の要因と水準を示す。シリーズI⁶⁾およびIIIは、筆者が作製したコンクリート試験体で促進中性化を行った。シリーズIIは、阿部が作製し恒温恒湿室に長期間保存され

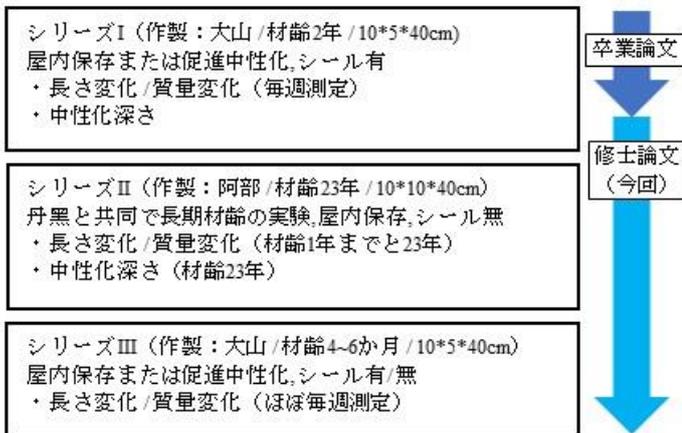


図1 研究の流れ

表1 実験の要因と水準

| 要因 | 水準 | | |
|-----------|---------------------------|-----------------|---------------------------|
| | I | II | III |
| シリーズ | I | II | III |
| 材齢 | 2年 | 23年 | 3か月 |
| 水セメント比 | 50, 60, 70% | 40, 55% | 50, 60, 70% |
| 試験体寸法(mm) | 100×50×400 | 100×100×400 | 100×50×400 |
| 単位水量 | 172kg/m ³ (一定) | 調合による | 172, 182kg/m ³ |
| 粗骨材種類 | 硬質砂岩碎石 (一定) | 碎石, 川砂利, 再生骨材7種 | 硬質砂岩碎石, 石灰石碎石, 再生骨材 |
| 保存条件 | 恒温恒湿, 促進中性化 | 恒温恒湿 | 恒温恒湿, 促進中性化 |
| シールの状況 | 4面シール | なし | なし, 4面シール |

ていたコンクリート試験体である。各試験体の記号は図2に示すとおりである。シリーズIIについては水セメント比、保存条件が同一のため粗骨材記号をコンクリート記号とした。各シリーズの試験項目と検討項目は表2に示すとおりである。

2.2 シリーズIおよびIIIの試験体の概要

表3にシリーズIおよびIIIの使用材料を、表4にはコンクリート調査表を示す。シリーズIでは、粗骨材は砂岩砕石のみ、シリーズIIIでは、粗骨材に砂岩砕石、石灰石砕石、再生骨材をそれぞれ用いてコンクリート試験体を作製した。シリーズIおよびIIIで使用されている砂岩砕石および陸砂（細骨材）は、同一産地の材料である。また、シリーズIIIにおけるCS172のコンクリートの調査は、AE剤使用量を除けばシリーズIの調査と同一である。

シリーズIおよびIIIでは、一部の試験体に促進中性化試験を実施したが、試験の結果を早期に得るために、水セメント比70%のものについても検討し、試験体寸法は、通常長さ変化試験に用いる試験体の半分の幅とした。これらの試験体は脱型後材齢4週まで標準養生を実施し、以降は20℃、60%R.H.の恒温恒湿槽で保存した。その後一定期間後に試験体の半数を20℃、60%R.H.、CO₂濃度5%の促進中性化槽へ移動した。また、シリーズIではすべての試験体について、シリーズIIIでは一部を除いて、促進試験開始時に試験体の打込み面、底面および両端面をエポキシ樹脂でシールした。なお、シリーズIおよびシリーズIIIのCSでは、JIS A 1153に準じて促進中性化試験を実施したが、シリーズIIIのCLおよびRHBについては、促進開始前の恒温恒湿槽での保存期間を9週とした。なお、これらについて、恒温恒湿槽で保存したものを乾燥試験体、促進中性化試験を行ったものを促進試験体と呼称する。

長さ変化は、埋込みゲージを用いて測定を行った。埋込みゲージによる測定はJISには規定されていないが、真野らの研究⁴⁾でも用いられ、同研究でJIS A 1129-1（コンパレータ方法）による測定とほとんど同等との結果が得られている。シリーズIにおける中性化深さの測定は、既往の研究⁸⁾から中性化深さが10mmおよび20mmとなる促進期間で実施した。

2.3 シリーズIIの試験体の概要

表5および表6に使用材料を、表7にはコンクリート調査表を示す。粗骨材は再生骨材7種を含め9種類で、再生骨材は製造方法および高度処理回数によって分類されている。試験体は脱型後材齢1週まで標準養生を行い、以降20℃、60%R.H.の室内の保存されていた。材齢23年経過した時点で、丹黒らと共同で長期材齢の測定を行った⁹⁾。長さ変化の試験はJIS A 1129-1に準じて実施し、材齢1, 2, 4, 8, 13, 17, 26, 52週および材齢23年で測定を行った。

(I) 50乾 (II) C (III) CS172-50乾あり
 ③ ④ ① ① ② ③ ④ ⑤

- ① 粗骨材種類（シリーズIIは一定）
- ② 単位水量（シリーズIIは一定）
- ③ 水セメント比（50/60/70, シリーズIIは一定）
- ④ 保存条件（乾/中, シリーズIIIは一定）
- ⑤ シールの有無（あり/なし, シリーズIIはありのみ, IIIはなしのみ）

図2 試験体の記号

表2 各シリーズの試験項目および検討項目

| シリーズ | 試験項目 | | | 検討項目 | | | | |
|------|------|------|-------|------|------|-------|------|-------|
| | 長さ変化 | 質量変化 | 中性化深さ | W/C | 単位水量 | 粗骨材種類 | 保存条件 | 試験体条件 |
| I | ○ | ○ | ○ | ○ | | | ○ | |
| II | ○ | ○ | ○ | | | ○ | | (○)* |
| III | ○ | ○ | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |

*シリーズIIIとの比較・検討に使用

表3 シリーズIおよびIIIの使用材料

| 種類(産地) | 記号 | 絶乾密度 (g/cm ³) | 表乾密度 (g/cm ³) | 吸水率 (%) | 実積率 (%) | 粗粒率 |
|------------|-----|---------------------------|---------------------------|---------|---------|------|
| 硬質砂岩砕石(多摩) | CS | 2.64 | 2.65 | 0.49 | 60.9 | 6.73 |
| 石灰石砕石(葛生) | CL | 2.73 | 2.75 | 0.75 | 61.1 | 6.90 |
| 再生骨材* | RHB | 2.59 | 2.62 | 1.25 | 61.4 | 7.12 |
| 大井川水系陸砂 | - | 2.53 | 2.58 | 2.10 | 65.9 | 2.65 |

*再生骨材は加熱すりもみにより製造されたもの。骨材品質はH。

表4 シリーズIおよびIIIのコンクリート調査表

| 粗骨材種類 | W/C (%) | W (kg/m ³) | 絶対容積(L/m ³) | | | AE減水剤 (C×%) | AE剤 (C×%) |
|-----------------|---------|------------------------|-------------------------|-----|-----|-------------|-----------|
| | | | C | S | G | | |
| CS | 50 | 172 | 109 | 315 | 359 | 0.25 | 0.0055* |
| | 60 | | 91 | 333 | | | |
| | 70 | | 78 | 346 | | | |
| CS CL RHB | 50 | 182 | 115 | 299 | 359 | 0.25** | 0.0055 |
| | 60 | | 96 | 318 | | | |
| | 70 | | 82 | 332 | | | |

*シリーズIのみ0.0045(C×%)

**AE減水剤はCLのみ0.40(C×%)

表5 シリーズIIの再生骨材の品質

| 再生骨材記号 | 原コンクリート採取場所 | 製造方法 | Fc (kgf/cm ²) | 高度処理回数 | 絶乾密度 (g/cm ³) | 表乾密度 (g/cm ³) | 吸水率 (%) | 単位容積質量 (kg/L) | 実積率 (%) | 品質規格 |
|--------|------------------|------|---------------------------|--------|---------------------------|---------------------------|---------|---------------|---------|------|
| K-KS-0 | 北青山(K) | KS | 180 | 0 | 2.35 | 2.47 | 4.91 | 1.48 | 59.9 | M |
| K-KS-3 | | | | 3 | 2.56 | 2.61 | 1.97 | 1.61 | 61.7 | H |
| K-KH-0 | | | | 0 | 2.32 | 2.44 | 5.02 | 1.43 | 58.7 | L |
| K-KH-2 | | KE | | 2 | 2.45 | 2.53 | 3.16 | 1.58 | 62.5 | M |
| K-KE-1 | | | | 1 | 2.30 | 2.43 | 5.43 | 1.45 | 59.7 | L |
| F-KS-0 | | | | 0 | 2.33 | 2.45 | 5.24 | 1.46 | 59.6 | L |
| S-KE-1 | 府中(F) 施工実験(S) | KE | 600 | 1 | 2.39 | 2.50 | 4.36 | 1.48 | 59.2 | M |

[注] 再生骨材の製造方法
 KS:インペラブレイカー + 改良型ジョークラッシャー
 KH:インパクトブレイカー + ダブルロールクラッシャー
 KE:ジョークラッシャー + 改良型コンクラッシャー

表6 シリーズIIの普通骨材の品質

| 種類 | 記号 | 名称 | 絶乾密度 (g/cm ³) | 表乾密度 (g/cm ³) | 吸水率 (%) | 単位容積質量 (kg/L) | 実積率 (%) | 微粒分量 (%) |
|-----|----|---------|---------------------------|---------------------------|---------|---------------|---------|----------|
| 粗骨材 | C | 青梅産砂岩砕石 | 2.63 | 2.65 | 0.72 | 1.56 | 59.3 | -- |
| | R | 秋田県産川砂利 | 2.49 | 2.56 | 2.90 | 1.64 | 64.1 | -- |
| 細骨材 | -- | 大井川水系陸砂 | 2.58 | 2.62 | 1.63 | 1.76 | 68.3 | 1.8 |

表7 シリーズIIのコンクリート調査表

| 試験体記号 | W/C (%) | W (kg/m ³) | 絶対容積(L/m ³) | | | AE減水剤 (C×%) | AE剤 (C×%) |
|--------|---------|------------------------|-------------------------|-----|-----|-------------|-----------|
| | | | C | S | G | | |
| C | 55% | 175 | 101 | 311 | 368 | 0.25 | 0.003 |
| R | | 163 | 94 | 301 | 397 | | 0.004 |
| K-KS-0 | | 175 | 101 | 284 | 395 | | 0.004 |
| K-KS-3 | | 172 | 99 | 277 | 407 | | 0.004 |
| K-KH-0 | | 175 | 101 | 292 | 387 | | 0.004 |
| K-KH-2 | | 172 | 99 | 272 | 412 | | 0.002 |
| K-KE-1 | | 175 | 101 | 285 | 394 | | 0.0025 |
| F-KS-0 | | 175 | 101 | 286 | 393 | | 0.003 |
| S-KE-1 | | 175 | 101 | 288 | 391 | | 0.003 |

3 長さ変化率の試験結果

3.1 シリーズIによる長さ変化率の試験結果の概要

図3にシリーズIの長さの経時変化を示す。単位水量を一定としたため乾燥試験体では水セメント比によらず同程度の変化率となっ

たと考えられる。一方で促進試験体では、乾燥試験体よりも明らかに大きな収縮が生じており、炭酸化収縮が生じているものと考えられる。また、促進初期においては水セメント比の大きい試験体の長さ変化率が大きくなったが、促進期間が長くなると、水セメント比の小さいコンクリートの長さ変化率が大きくなる傾向がみられる。これは、水セメント比の小さいコンクリートは中性化の進行が遅いものの、単位セメント量が大きいためにセメント硬化体の炭酸化収縮による長さ変化の総量が大きくなるためであると考えられる。なお、セメントペースト硬化体やモルタルバーを用いた既往の研究¹⁾と比較して、促進初期のグラフの立ち上がり方が緩やかであるが、これは試験体が大きいことに加え、粗骨材が収縮に対して抵抗しているものと考えられる。

3. 2 シリーズ III における粗骨材種類による長さ変化率

図 4 にシリーズ III (シールあり) の長さの経時変化を示す。乾燥試験体では、CL の変化率が最も小さく、CS が最も大きい。促進試験体においても CL の変化率は最も小さいが、CS と RHB は同程度である。CS の単位水量による差異は乾燥および促進のどちらについても明瞭ではなく、単位水量の変化が 10kg/m^3 程度では長さ変化率に差異は認められなかった。促進試験体についても、乾燥収縮と同様の結果となった。いずれの試験体でも促進中性化開始直後にわずかな膨張傾向がみられた。これについて明確なことは分からないが、乾燥 4 週で促進中性化を開始した CS と乾燥 9 週で促進中性化を開始した CL および RHB では、後者の試験体が収縮に転じるまでの期間が長い。このことから、コンクリートの含水状態が促進中性化を実施した際の体積変化に影響を与えている可能性がある。また、促進試験体で CS と RHB の長さ変化率は同程度だが、膨張から収縮へ転じるまでの期間を考慮すると今後逆転する可能性はある。

3. 3 シリーズ III におけるシールの有無による長さ変化率

図 5 にシリーズ III の CS182 におけるシールの有無による長さ変化率を示す。また、シールの有無による長さ変化率の原点回帰直線の係数は表 8 にまとめるとおりである。水セメント比や粗骨材によって一様ではなく、乾燥試験体は特に明瞭でない。これは週ごとの変化率が大きい乾燥開始初期から期間を設けてシールを施したためであると考えられる。促進試験体では、シール無しの試験体はシールありのものよりも長さ変化率が大きくなった。また、シールの有無による変化率の差異は、水セメント比 50% および 60% では粗骨材種類によって一様でないが、水セメント比 70% のものは粗骨材によらず最も小さくなった。このことから、水セメント比が大きく中性化の進行が早いコンクリートでは、水セメント比の小さいコンクリートよりも表面積による長さ変化率への影響が小さいと考えられる。

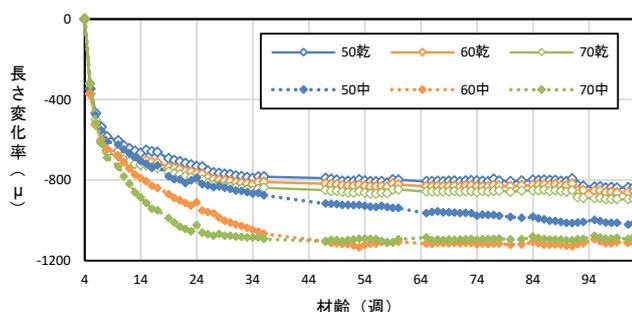


図 3 長さの経時変化 (シリーズ I)

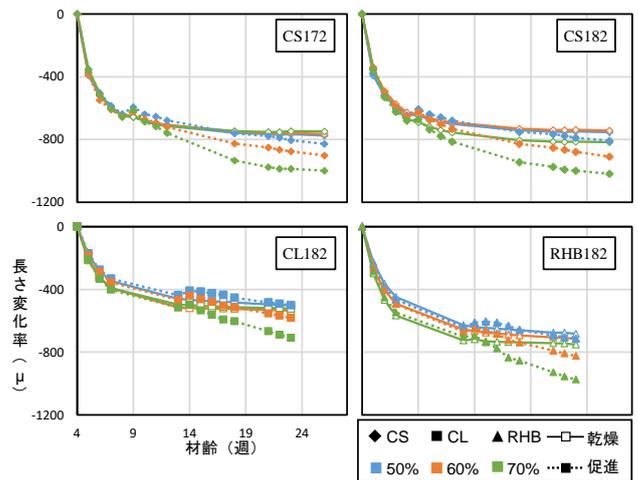


図 4 長さの経時変化 (シリーズ III・シールあり)

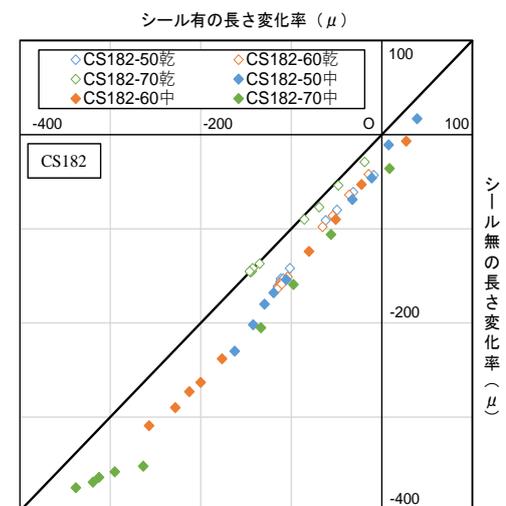


図 5 シールの有無による長さ変化率 (CS182)

表 8 シールの有無による長さ変化率の線形近似式の係数

| 試験体 | W/C | $y=ax$ の傾き a | | 試験体 | W/C | $y=ax$ の傾き a | |
|-------|-----|----------------|-----------|--------|-----|----------------|-----------|
| | | 乾燥 | 促進 中性化 | | | 乾燥 | 促進 中性化 |
| CS172 | 50 | 1.18 | 1.19 | CS182 | 50 | 1.42 | 1.41 |
| | 60 | 1.14 | 1.22 | | 60 | 1.45 | 1.28 |
| | 70 | 1.18 | 1.10 | | 70 | 1.02 | 1.21 |
| CL182 | 50 | 1.24 | 1.40 | RHB182 | 50 | 1.12 | 1.62 |
| | 60 | 2.10 | 1.51 | | 60 | 0.94 | 1.59 |
| | 70 | 0.55 | 1.30 | | 70 | 1.43 | 1.30 |

4 質量変化率の試験結果

4. 1 シリーズ I による質量変化率の概要

図 6 にシリーズ I の質量の経時変化を示す。水セメント比の大きいものは乾燥による質量変化率が大きい。促進試験体は、コンクリートが CO_2 を吸収するため質量が増加する。促進初期において、質量変化率は水セメント比の大きいものほど大きいですが、促進期間が長くなるとこの傾向は逆転している。これについては、長さ変化率と同様の理由であると考えられる。

4. 2 粗骨材条件による質量変化率

図 7 にシリーズ III の質量の経時変化を示す。乾燥による質量変化率では、RHB に大きな質量減少が見られた。CL および CS172、CS182 では同程度の質量変化率だが、水セメント比が大きいコンクリートではやや差異が見られ、CS182 は質量減少が大きく、CS172

が最も質量の減少が少なかった。質量変化率は、骨材およびコンクリートの吸水率の影響が大きいいためこのような結果になったと考えられる。促進試験体では、乾燥期間の長い CL および RHB は、CS を用いたコンクリートよりも大きく質量が増加した。これは、CL および RHB は促進中性化槽へ移動させる前の乾燥期間が長く、コンクリートが CS よりも乾燥していたため、中性化が進みやすかったことが考えられる。CL と RHB、CS172 と CS182 ではそれぞれ同程度の質量変化率であるが、それぞれ CL と CS172 のほうがやや小さい質量変化率を示した。これについて、明瞭な結果を得るためには、今後長期的な測定を行う必要があると考えられる。

4.3 試験体条件による質量変化率

図 8 にシリーズ III の CS182 におけるシールの有無による質量変化率の関係を示す。シリーズ III のシールの有無による質量変化率の関係を原点回帰したときの係数は表 9 にまとめるとおりである。長さ変化率と同様に水セメント比や粗骨材によって一様ではなく、乾燥試験体についても同様に明瞭ではない。促進試験体では、シールなしの試験体がシールありのものよりも大きな質量変化率を示し、水セメント比の小さいものが大きな傾きとなる傾向がある。

5 中性化深さの測定結果

表 10 にシリーズ I および II の中性化深さの測定結果および中性化速度係数を示す。乾燥試験体では時間変数 t を年単位とし、促進試験体では週単位とした。促進試験体では当然のこと、シリーズ I の乾燥試験体およびシリーズ II ではともに中性化が確認された。

ここで、シリーズ I の促進試験体の質量変化率と中性化深さの関係を図 9 に示す。ただし、図 9 における質量変化率は促進試験体の質量変化率から乾燥試験体の質量変化率を減じたもの (m_{CO_2} とする) をそれぞれの単位セメント量および開放面積 ($100 \times 400 \text{ mm}^2 \times 2$ 面) で割ったものである。 m_{CO_2} は乾燥による質量減少を除いた中性化のみによる質量増加と考えられる。図 9 では、質量変化率と中性化深さは水セメント比によらずほぼ同一の直線関係となっており、コンクリートの質量変化率から中性化深さを推定できる可能性がある⁷⁾。

さらに、シリーズ I と CS172 は調査が共通であるため、CS172 (シールあり) の m_{CO_2} から算定した中性化深さを表 11 に示す。試験体の空気に触れるすべての表面から該当深さが中性化したと考えれば、シールありに対するシールなしの倍率は中性化深さが大きくなるほど小さくなり、双方の試験体が完全に中性化すると倍率は 1 になる。図 10 に、いま求めた倍率と表 11 を用いて CS172 (シールなし) の m_{CO_2} の予測値を求め、実測値との関係を示す。水セメント比 70%

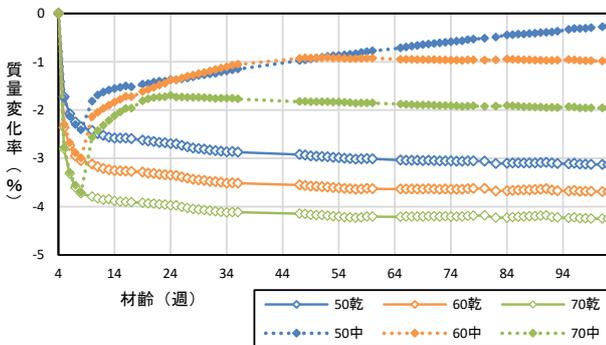


図 6 質量の経時変化 (シリーズ I)

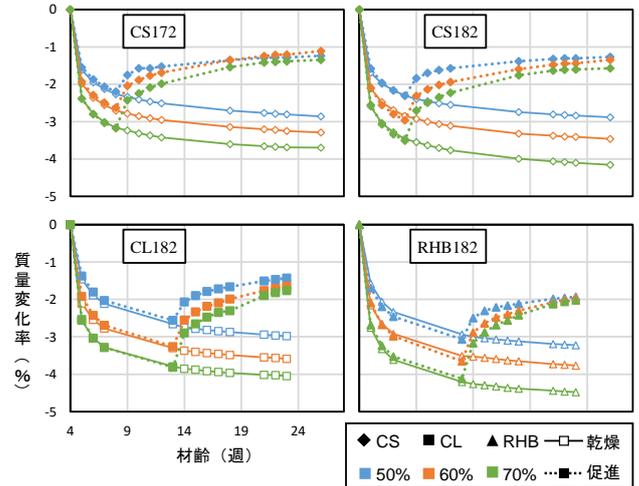


図 7 質量の経時変化 (シリーズ III・シールあり)

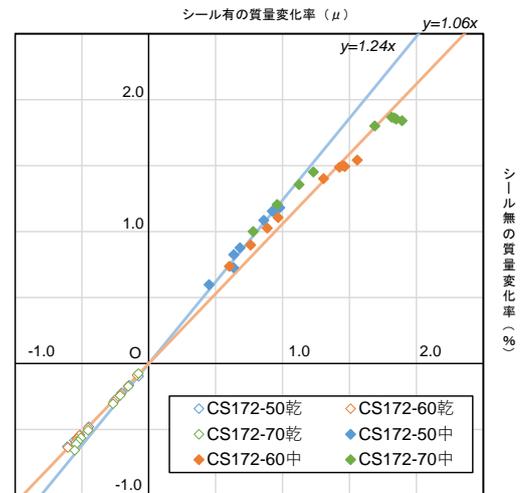


図 8 シールの有無による質量変化率 (CS172)

表 9 シールの有無による質量変化率の線形近似式の係数

| 試験体 | W/C | $y=ax$ の傾き a | | 試験体 | W/C | $y=ax$ の傾き a | |
|-------|-----|----------------|-------|--------|-----|----------------|-------|
| | | 乾燥 | 促進中性化 | | | 乾燥 | 促進中性化 |
| CS172 | 50 | 1.06 | 1.24 | CS182 | 50 | 1.07 | 1.36 |
| | 60 | 1.07 | 1.06 | | 60 | 1.16 | 1.13 |
| | 70 | 1.14 | 1.06 | | 70 | 1.02 | 1.02 |
| CL182 | 50 | 0.89 | 1.28 | RHB182 | 50 | 1.08 | 1.24 |
| | 60 | 0.90 | 1.22 | | 60 | 1.18 | 1.22 |
| | 70 | 0.76 | 1.11 | | 70 | 0.75 | 1.23 |

表 10 中性化深さの測定結果

| シリーズ | 記号 | W/C | 測定時期 (週) | 中性化深さ (mm) | 中性化速度係数 | シリーズ | 記号 | W/C | 測定時期 (年) | 中性化深さ (mm) | 中性化速度係数 | |
|------|------|-----|----------|------------|---------|------|----|-----|----------|------------|---------|------|
| I | 70 中 | 70 | 2 | 11.9 | 8.41 | II | C | 55 | 23 | 13.6 | 2.78 | |
| | | | 5 | 16.8 | 7.51 | | | | | 14.2 | 2.89 | |
| | 60 中 | 60 | 5 | 11.6 | 5.19 | | | | | K-KS-0 | 15.6 | 3.19 |
| | | | 19 | 19.1 | 4.38 | | | | | K-KS-3 | 13.5 | 2.76 |
| | 50 中 | 50 | 13 | 9.9 | 2.75 | | | | | K-KH-0 | 16.5 | 3.36 |
| | | | 52 | 17.8 | 2.47 | | | | | K-KH-2 | 12.9 | 2.63 |
| | 70 乾 | 70 | 6.9 | 4.54 | K-KE-1 | | | | | 12.9 | 2.62 | |
| | 60 乾 | 60 | 120 | 5.2 | 3.42 | | | | | F-KS-0 | 17.3 | 3.53 |
| | 50 乾 | 50 | 4.0 | 2.63 | S-KE-1 | | | | | 13.4 | 2.74 | |

[注]シリーズ I の促進試験体では、測定時期は促進期間、速度係数は $t=$ 週とした。シリーズ I の乾燥試験体の測定時期は乾燥開始から 120 週である。

についてはよく対応しているが、水セメント比 50% および 60% では、予測値のほうが 1.15 倍程度大きくなっている。この理由としては、中性化深さが小さいほどシールの有無による倍率が大きくなるため、特に促進期間が短く中性化の進行が遅い場合には予測値と実測値の差が大きくなりやすいと考えられる。

6 長さ変化率および質量変化率の関係

6.1 長さ変化率と質量変化率の概要

図 11 にシリーズ I の長さ変化率と質量変化率の関係を示す。すべての試験体において、一度質量減少に大きく振れているが、以降は長さ変化と質量変化はほぼ一定で推移しており、二つの直線が「厂」の形に合わさったような形をしている。既往の研究で示した、乾燥に伴い毛細管空隙の水分が離れることによる収縮については、ふたつめの直線がそれである。対して、ひとつめの直線は乾燥収縮に影響しにくい大きな空隙から水分が逸散したことで生じるとされており、ふたつめの直線を X 軸上方に延伸し長さ変化が 0 となる (x 切片) 際の質量変化率は、乾燥収縮に寄与しない水分量、すなわちエントレインドエアやエントラップドエアなどの比較的大きな細孔に留まっている水分量と考えられる²⁾。

一方で、促進試験体では、促進初週に一度大きく質量増加に振れたあと一定の傾きで推移しており、挙動としては乾燥試験体に似ているが、こちらは初週の長さ変化率が乾燥開始初週の変化率に比べてかなり小さい。また、促進試験体のふたつめの傾きは CO₂ 吸収量に対する長さ変化率であることから、傾きの大小は炭酸化収縮が生じた際の抵抗性と読み替えることができる。

6.2 シリーズ II および III の乾燥による長さおよび質量変化の関係

図 12 および図 13 にシリーズ II および CS182 の長さ変化率と質量変化率の関係を示す。先述の通り「厂」のような形になっているが、このとき、二つめの直線部分を $y = ax + b$ で線形近似した際の係数および x 切片 ($-b/a$) を表 12 にまとめる。シリーズ II は粗骨材の種類によっておおむね 2 つグループに大別できる。C、K-KS-3、K-KH-2 および S-KE-1 は初週の質量減少率が小さい右側のグループで、それ以外の骨材は左側のグループとなった。前者に含まれる再生骨材は高度処理が行われており吸水率が小さい。シリーズ II は調査が一様ではないが、再生骨材についてはおおむね骨材の吸水率に従う形となった。シリーズ III では、初週の質量変化率は粗骨材種類によらずほぼ同じだが、x 切片は CS が最も小さくなった。CS 同士では特に水セメント比が大きい試験体で x 切片による差が大きいため、収縮に寄与しない水分量は単位水量および水セメント比が大きいもので大きくなると考えられる。また、単位水量 182kg/m³ のグループは、水セメント比ごとのモルタルの調合が同一であるため、粗骨材種類による差異は粗骨材の吸水率によるものと考えられる。

グラフの傾きで見ると、シリーズ II では、左側のグループのコンクリートは傾きが大きい。シリーズ I および III では水セメント比と

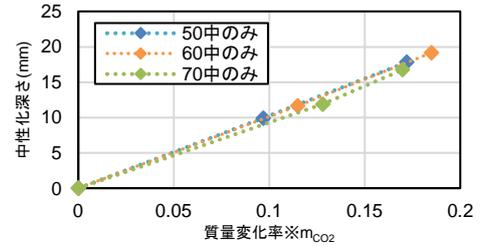


図 9 中性化深さと質量変化率の関係 (シリーズ I)

表 11 シリーズ I から推定した CS172-中での中性化深さ

| 週 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 10 | 13 | 14 | 15 | 18 |
|-----|----------------------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|
| W/C | 推定中性化深さ (シールあり) (mm) | | | | | | | | | |
| 50 | 0 | 3.9 | 5.8 | 6.3 | 7.0 | 9.8 | 10.7 | 11.0 | 11.1 | 11.8 |
| 60 | 0 | 6.2 | 8.2 | 9.8 | 11.0 | 15.7 | 17.4 | 17.8 | 18.0 | 19.4 |
| 70 | 0 | 8.9 | 11.6 | 13.9 | 15.6 | 22.3 | 24.2 | 24.6 | 25.0 | 25.5 |

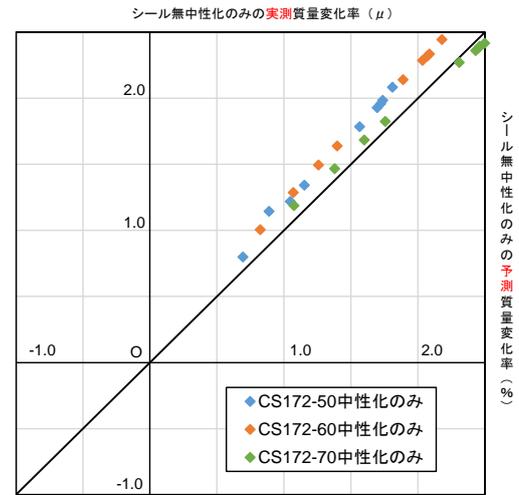


図 10 質量変化率の予測値と実測値 (CS172 シールなし)

グラフの傾きの関係は必ずしも明瞭ではないが、粗骨材種類でみると CL および RHB は小さくなっている。これについて、粗骨材種類で固有であるため、傾き a と各粗骨材の絶対乾密度、吸水率、単位容積質量および実積率との関係を調べたが、いずれも良好な関係は確認できなかった。

シリーズ II の 23 年での測定時に、質量が増加に転じ長さ変化率も収縮方向に大きくなっているが、表 10 に示すように中性化が進行しているため、CO₂ を吸収して炭酸化収縮が生じたものと考えられる。シリーズ I においても中性化は進行しているが、このような挙動は認められない。井上らの研究¹⁰⁾では、恒温恒湿環境における

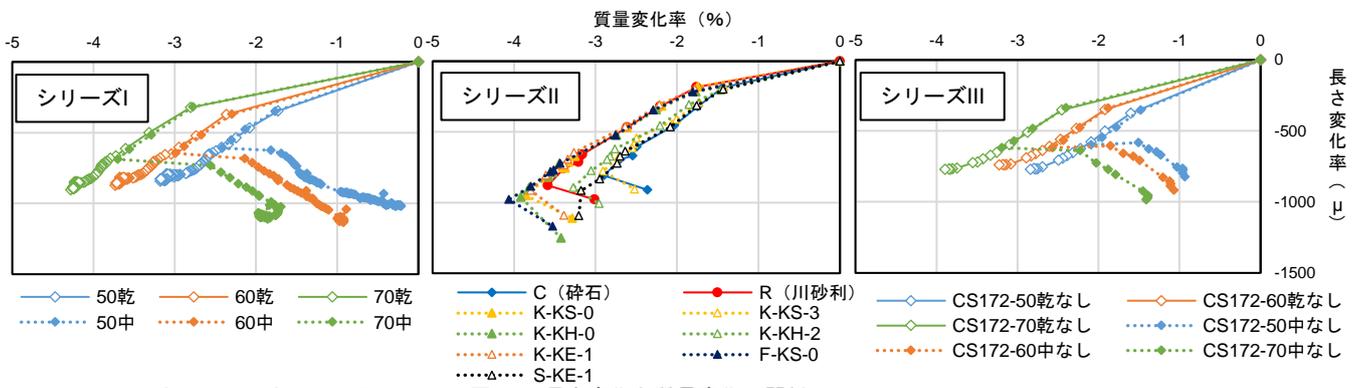


図 11 長さ変化と質量変化の関係 (シリーズ I)

図 12 長さ変化と質量変化の関係 (シリーズ II)

図 13 長さ変化と質量変化の関係 (シリーズ III・CS172 シールなし)

質量の増加は200週程度から生じており、水セメント比の大きさを考慮してもシリーズIの乾燥試験体で質量が増加するためにはさらに期間が必要になると考えられる。また、促進環境と実環境では中性化深さと炭酸化フロントが異なる¹¹⁾ことに加え、炭酸化収縮は未炭酸化部の抵抗を受けるため、特に中性化深さが浅い時期に関しては促進試験体の長さ変化および質量変化とは異なる挙動をとるものと考えられる。

6.3 中性化による長さ変化と質量変化の関係

図14にシリーズIII(シールあり)の促進試験体の長さ変化と質量変化の関係を示す。いずれも水セメント比50%のコンクリートのふたつめの直線の傾きが大きくなっているが、図11に示すようにシリーズIでも同様である。シリーズIでは、一定期間後に傾きが小さくなっているため、シリーズIIIでも今後傾きが小さくなる可能性がある。促進試験体では炭酸化収縮に加え乾燥収縮も生じており、乾燥収縮が緩やかになる期間で促進試験体の長さ変化率も緩やかになったと考えられる。また、CLはほかの粗骨材と比較して傾きが小さく、長さ変化率も小さくなっている。CO₂の吸収量に対しての長さ変化率が小さいと考えられるため、CLは乾燥収縮だけでなく炭酸化収縮への抵抗性も優れていると考えられる。

今回シリーズIIIでは、シールの有無に関わらず促進中性化試験開始直後にほとんどの試験体で膨張が見られた。シリーズIは促進初週の測定を行っていないため、膨張は確認できていないが、促進2週目の測定値は以降の傾向を考慮するとやや変化率が小さいため、試験体の膨張が生じていた可能性はある。膨張したコンクリートが再び収縮に転じるまでの質量変化率は水セメント比の大きいコンクリートで大きくなった。

7 結論

本研究では、厚みの小さいコンクリート試験体を作製しそれぞれ恒温恒湿環境および促進環境に置くことで、乾燥収縮および炭酸化収縮を観測することができた。本研究の成果は以下のようにまとめられる。

- (1) 促進環境で保存したコンクリートには、恒温恒湿環境に置いたものと比較して明らかに大きな収縮が生じており、炭酸化収縮が生じたものと考えられる。
- (2) 粗骨材種類によるコンクリートの収縮は、乾燥収縮・炭酸化収縮ともに石灰石砕石を用いたコンクリートで変化率が小さくなった。特に促進試験体について、CO₂の吸収量に対して収縮量が小さいことから、コンクリートの乾燥収縮を低減させる粗骨材は炭酸化収縮に対しても効果があると考えられる。
- (3) シリーズIの質量変化率と中性化深さの関係からCS172の中性化深さを推定した。また、それを用いて中性化体積比からシールの有無による質量変化率を予測し比較を行った。水セメント比70%のものでは、予測値と実測値が近い数値となったが、水セメント比50%および60%のものでは予測値が大きくなった。シールの有無による質量差は中性化深さが小さいほど大きくなるため、中性化の進みにくいコンクリートでの予測にはより正確なデータが必要になると考えられる。
- (4) 乾燥試験体の長さ変化率および質量変化率の関係からグラフを線形近似し乾燥収縮に関係しない水分量を算定した。それ

表12 各シリーズの長さ変化と質量変化の近似直線の係数

| 試験体 | W/C | y=ax+b | | | 試験体 | W/C | y=ax+b | | |
|--------|-----|--------|-----|-------|--------|-----|--------|-----|-------|
| | | a | b | -b/a | | | a | b | -b/a |
| シリーズI | 50 | 377 | 303 | -0.80 | CS172 | 50 | 375 | 218 | -0.58 |
| | 60 | 368 | 481 | -1.31 | | 60 | 355 | 326 | -0.92 |
| | 70 | 411 | 854 | -2.08 | | 70 | 345 | 438 | -1.27 |
| C | | 410 | 398 | -0.97 | CS182 | 50 | 398 | 261 | -0.66 |
| R | | 371 | 489 | -1.32 | | 60 | 363 | 412 | -1.13 |
| K-KS-0 | | 358 | 459 | -1.28 | | 70 | 348 | 564 | -1.62 |
| K-KS-3 | | 385 | 372 | -0.97 | CL182 | 50 | 246 | 178 | -0.72 |
| K-KH-0 | 55 | 342 | 412 | -1.20 | | 60 | 211 | 218 | -1.03 |
| K-KH-2 | | 373 | 367 | -0.98 | | 70 | 239 | 397 | -1.66 |
| K-KE-1 | | 347 | 447 | -1.29 | RHB182 | 50 | 255 | 194 | -0.76 |
| F-KS-0 | | 337 | 408 | -1.21 | | 60 | 260 | 271 | -1.04 |
| S-KE | | 408 | 395 | -0.97 | | 70 | 251 | 427 | -1.70 |

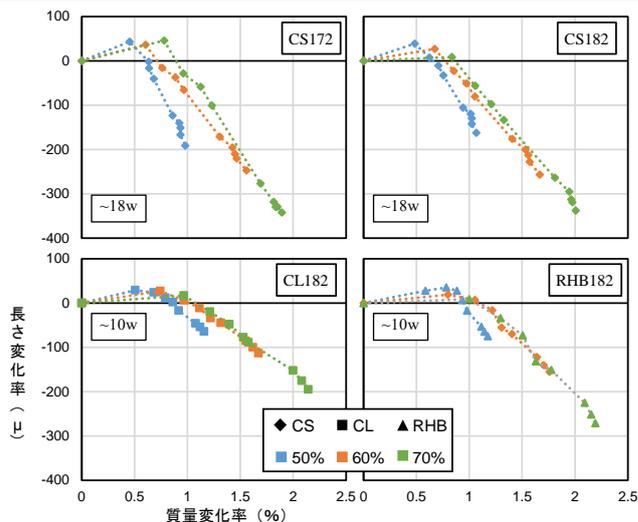


図14 促進試験体の長さおよび質量の変化率の関係(シールあり)

ぞれ単位水量、水セメント比、粗骨材種類によって差異が見られた。近似した直線の傾きについて粗骨材の絶対密度、吸水率、単位容積質量および実積率との関係を調べたが、良好な結果は得られなかった。

- (5) シリーズIの乾燥試験体では中性化が生じていたが、乾燥収縮以上の長さ変化や質量の増加は認められなかった。これは、通常的环境においては、炭酸化は非常にゆっくりと進むために促進環境とは挙動が異なるためと考えられる。
- (6) シリーズIIIでは促進中性化開始直後に、シールの有無に関わらず試験体にわずかに膨張が見られた。この膨張については、促進開始時の含水状態が関連するものと思われるが、詳細が不明なため検討の余地がある。

【参考文献】

- 1) 上村克郎：乾燥と中性化によるモルタルの収縮と重量変化(1)および(2)、セメント・コンクリート、No.207, pp.2-6, 1964 および No.208, pp.12-20, 1964
- 2) セメント・コンクリート研究会 水委員会：セメント・コンクリート中の水の挙動、TCR, pp.55-61, 1993
- 3) 中田清史、野口貴文：セメント硬化体の炭酸化過程における体積変化に関する考察、コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.459-464, 2018
- 4) 安田延明、大羽伸和、西野由記彦：窯業系サイディング材の諸物性に及ぼす炭酸化の影響(その2 物性試験)、日本建築学会大会学術講演梗概集, No.1993, pp.357-358, 1993
- 5) 松下文明、青野義道、柴田純夫：オートクレーブ養生軽量気泡コンクリートの炭酸化収縮、コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.463-468, 20005
- 6) 大山優、阿部道彦、田村雅紀：コンクリートの中性化による質量変化および収縮の挙動に関する実験(その2)、日本建築学会大会学術講演梗概集, No.2019, pp.737-738, 2019
- 7) 真野孝次、鹿毛志雄、兼松学、松田拓、今本啓一、阿部道彦：非鉄スラグを使用したコンクリートの圧縮強度・乾燥収縮、日本建築学会関東支部研究報告集 I, No.87, pp.45-48, 2017
- 8) 鈴木賀久、阿部道彦：コンクリートの中性化に及ぼす温度条件の影響(20°Cと40°Cの比較)、日本建築学会関東支部研究報告集, No.87, pp.125-128, 2017
- 9) 丹黒浩平、齊藤辰弥、阿部道彦：再生骨材コンクリートの長期的性状、日本建築学会関東支部研究報告集, No.89, pp.53-59, 2019
- 10) 井上和政、岩清水隆：乾燥収縮率が異なるコンクリートの長期の乾燥収縮ひずみに及ぼす材料厚の影響、日本建築学会技術報告集, Vol.26, No.62, pp.13-18, 2020
- 11) 伊代田岳史、中村絢也、後藤誠史：セメント硬化体の炭酸化機構の検討—実環境と促進環境の相違について—、セメント・コンクリート論文集, Vol.72, No.1, pp.225-232, 2018