

乾湿潤作用下におけるコンクリートマトリクスの微小水循環と 実構造物との対応に関する研究

ケイコン(株) ○長谷川光弘 日大研究所 近藤 勉 日大生産工 木田 哲 量
日大生産工 加藤清志 日大生産工 山本高義 浅野工専 加藤直樹

1. まえがき

コンクリート構造物は常に苛酷な自然環境化にありながらその実態はあまり知られていない。著者らは四季を通じて RC 構造物がどのような状況下に置かれているのか、夏季の炎天下に降雨を受けた場合にはどのような挙動を示すのか、また、コンクリートマトリクスの膨張・収縮の大きな要因は何か、なぜそのようなものかなどを解明し、RC 構造物の高耐久性化のため、技術手法を確立することを目的としている。

その劣化要因の一つに乾湿潤作用が上げられ、コンクリート中の微細構造(microstructure)中への吸水・脱水の繰返し挙動がある。現象的には、環境水濃度の希薄化・中和則・乾湿潤膨張現象・ボイルーシャル法則といったさまざまな物理・化学的原理が適用されるメカニズムによって支配される。本報では、既報¹⁾以上を総括し、とくに、マトリクス内部での吸排水力によるメカニズムを定式化した。

2. 乾湿潤作用によるコンクリートの変形

真夏の炎天下、コンクリートの表面温度は直射日光を受ける場所では 60℃を越えることがある。また、冬季には零度以下にもなり、一年を通じてのコンクリート温度差は最大で 70℃前後にもなる。そこで、年間を通じてコンクリート構造物がどのような変化を示すか、40×40×160mm 供試体で調べることにした。ただし、この値はコンクリートの表面温度のみの変化で、方位の影響もあり構造物全体としてみることはできない。

2.1 実験方法および配合種別

表 1 に示す 2 種類の配合により 40×40×160mm コンクリート供試体(粗骨材最大寸法 20mm、細骨材は山砂)を作製し、太陽光線の照射を受ける場所と太陽光線の照射を受けない北側壁面に設置した。供試体両端部には長さ変化率測定用プラグを埋設し、長さ変化率を自動計測できる測定機器を使用した。

2.2 実験結果と考察

2.2.1 年間長さ変化率

表 1 の配合にて長さ変化率を測定したものを図 1～2 に示す。図 1 は南側壁面の直射日光の当る場所に静置、また、図 2 は北側壁面の太陽光線の当たらないところに

静置したものである。結果を見ると、水セメント比が異なっても供試体の長さ変化に大きな差がなく、また、年間を通じ、とくに夏季に極端に膨張し、冬季に収縮するとは限っていない。春の降雨時の方が夏季より膨張しており、水分ならびに湿度による影響の大きいことがわかる。

表 1 供試体の配合

W/C(%)	C(kg)	W(kg)	S(kg)	G(kg)
41.4	350	145	730	1107
57.0	281	160	850	951

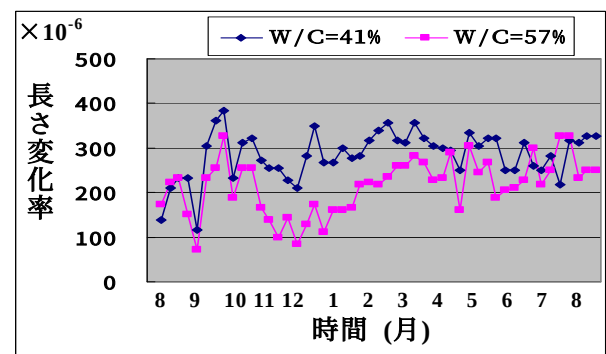


図 1 南側壁面静置供試体週間隔年間長さ変化率

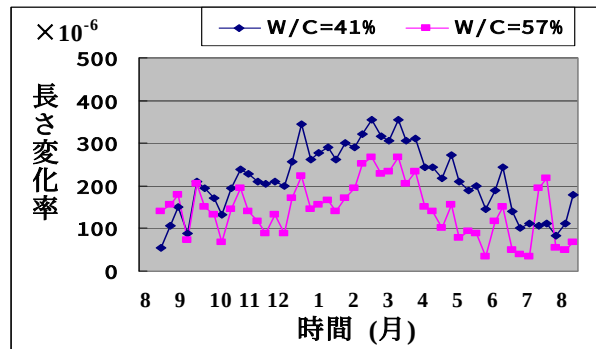


図 2 北側壁面静置供試体週間隔年間長さ変化率

2.2.2 夏季に於ける方位と長さ変化率

図 3～4 は 8 月下旬から 10 月上旬にかけて、上記配合による供試体を南側壁面、北側壁面のそれぞれに静置し、午前 8 時と 15 時の 2 回、長さ変化率を測定したも

Correspondence of Water-Microcirculation of Concrete Matrix
under Wet-Dry Action with Existing Concrete Structure

by

Mitsuhiro HASEGAWA, Tsutomu KONDO, Tetsukazu KIDA, Kiyoshi KATO,
Takanori YAMAMOTO and Naoki KATO

のである。南側壁面に設置したものは、日中の温度変化も加わっていて、両方とも最大で 500×10^{-6} 、平均で 300×10^{-6} 程度の変化が見られる。

ひび割れの入る限界は 300×10^{-6} とされ、この値に達し、あるいは超過しているところから供試体には幅 0.04 mm 程度の横断ひび割れが発生しているのが確認された。

また、北側壁面に設置したものは、直射日光の照射のない分だけ供試体の温度上昇がなく、長さ変化率は平均 150×10^{-6} 程度とやや小さい値を示している。

2.2.3 夏季、夕立時における供試体の挙動

夏季の午後、60℃近くに熱せられるコンクリート供試体が降雨に遭遇したときの長さ変化率を測定したのが図5である。ここで、降雨とともにコンクリート構造物表面は数分間急激に収縮させる。しかし、図6に示すように降雨は構造物内部に浸透してゆく。

ある程度水分が浸透すると今度は水分の含水で供試体は膨張に転じた。散水は22分間継続したが、供試体が膨張から収縮に転じたのは開始から17分後で、これは降雨温度が30℃で、供試体全体が蒸発の潜熱により冷却され収縮したことによる。

2.2.4 降雨後、直射日光に暴露された供試体の挙動

降雨後、再び飽水状態の供試体を太陽光にばくろしたが、この供試体は図7のように外気温度32℃で10

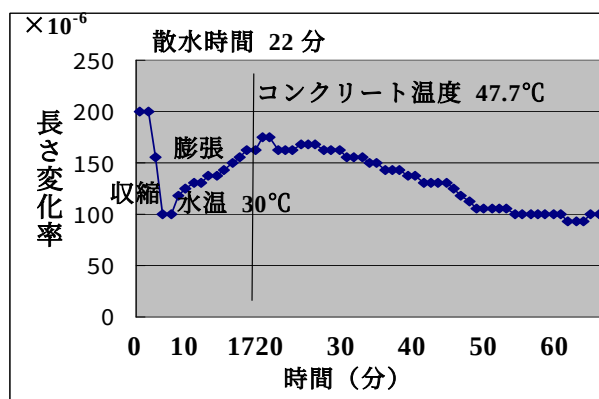


図5 絶乾状態で降雨に遭遇した場合

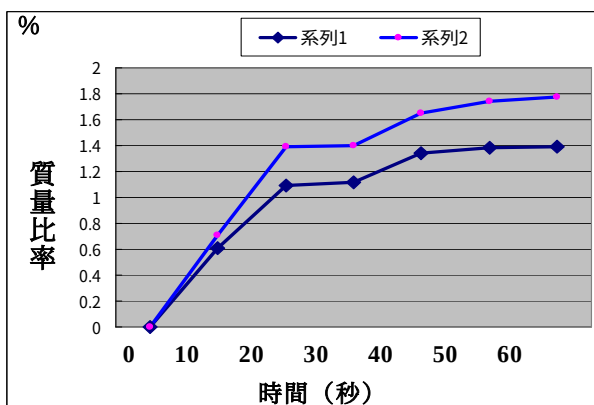


図6 吸水状態

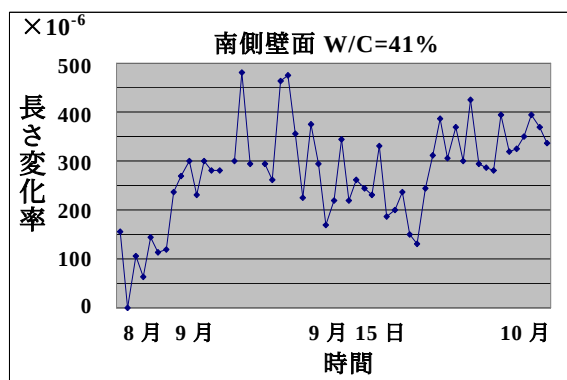


図3 南側壁面で測定した長さ変化率

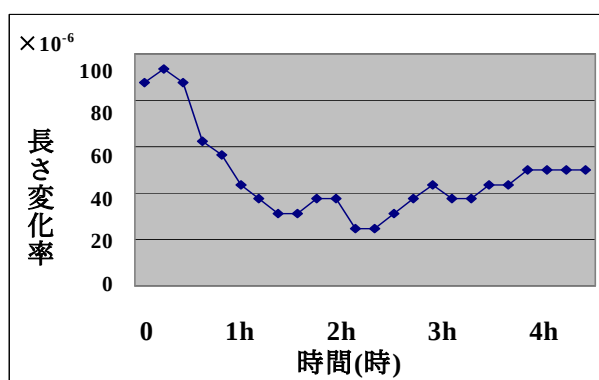


図7 降雨後直射日光の照射を受けた場合

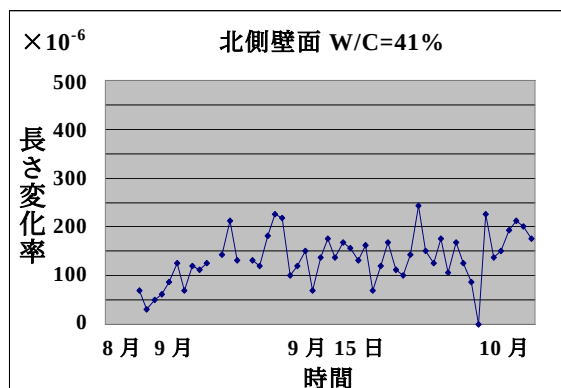


図4 北側壁面で測定した長さ変化率

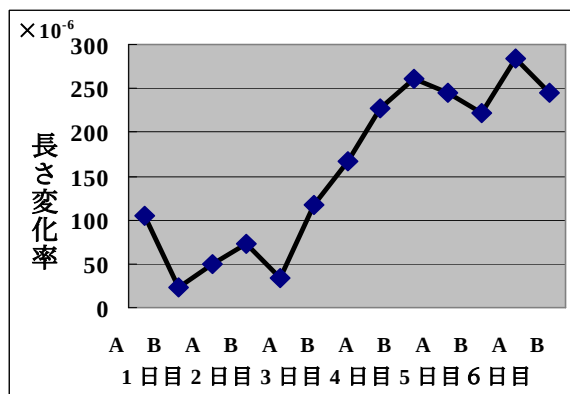


図8 降雨による膨張

$\times 10^{-6}$ 程度いったん膨張するが、水分の蒸発による収縮と、気化熱による表面温度の低下で収縮に転じている。その後、 80×10^{-6} 程度収縮に転じた。引き続き表面の水分がある程度発散すると、再度、膨張に転じている。要するに環境水が吸水・脱水の影響で構造部材は複合挙動を示す。すなわち、コンクリート供試体の膨張収縮の状態は水分と温度の湿潤密接に関係しており、温度が上昇したから膨張するとは限らず、また、降雨により水分が浸透し、温度が低下するから収縮するとも限らないという、常にきわめて複雑な挙動を示すことがわかる。

2.2.5 降雨による膨張

図 8 において A は午前 8 時、B は午後 3 時に測定した値で、曇天、降雨を繰り返した残暑厳しい 9 月初旬、外気温度は $26^{\circ}\text{C} \sim 30^{\circ}\text{C}$ であった。降雨時、外気温度は 22°C まで低下したが供試体は水分吸収により 250×10^{-6} も膨張する結果となった。単に外気温度が高いから膨張し、また、降雨があったから収縮するとは限らず、水分による長さ変化率は温度に関係なく大きく変化する。すなわち、長さ変化は含水率依存性である。

3. 乾湿潤作用生起のメカニズム

3.1 常温で絶乾から湿潤状態に変質する場合

図 9 はモルタルマトリックス（セメント砂比 1:3、水セメント比 0.5）の脱水・吸水の時間経過関係であり、供試体寸法は $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$ で全体の質量変化を示している。モルタルバー供試体を水中養生の後、絶乾状態にし、その後水中浸漬を行って吸水状態を確認した。実験の結果、1hr で全質量に対し約 5% の吸水があった事を示し、図 10 よりマトリックス中に浸入する水の速度は最初の 1 分間では 1 mm/min と早く、ここに酸性雨類がコンクリート構造物マトリックス内に進入すると、

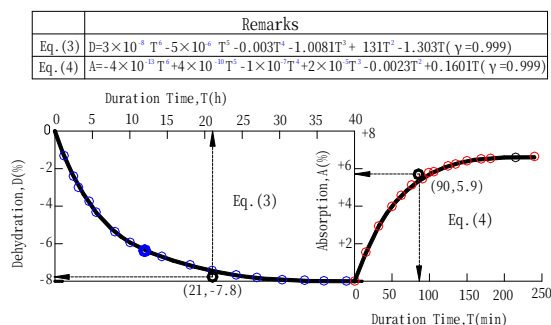


図 9 脱水・吸水による時間経過の関係

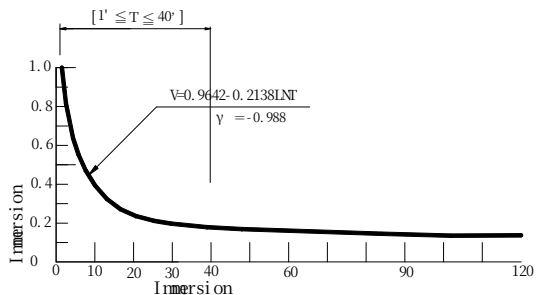


図 10 浸透速度と浸透時間の関係



(一辺は 40 mm)

図 11 水中浸漬 6 分経過後

第一に $\text{Ca}(\text{OH})_2$ と中和反応を生起させ、第二にアルカリ度の低下と共に CSH 系化合物の分解が促進され、劣化へと連携させることになる。以後、浸透速度は 0.2 mm/min の定常浸透速度となる。

夏季に太陽の直射日光を受ける面における・乾燥湿潤作用による環境水の微小水循環は、コンクリートマトリックスを早期に中性化促進させるというメカニズムを示した。図 11 は絶乾資料を水中浸漬した破断面状況例で、マトリックス表層面から中心部に向かい 6 分経過後の状態を示す。

3.2 ボイル・シャルル法則適用による内圧

夏季、地上 1.5m 程度で $35 \sim 40^{\circ}\text{C}$ の極暑環境となり、コンクリート舗装の表面（肌）温度は $40 \sim 55^{\circ}\text{C}$ にも達し、絶乾状態となっている。当然この環境下では降雨または散水を受けると蒸発の潜熱（気化熱：Latent heat）の影響を受け、舗装版等の温度は降雨温度に安定化する。よって、温度(t)・圧力(P)・体積(V)変化を考慮した Boyle's-Charles' law の適用が可能になる。すなわち上記事象に対し、

$$P_1 V_1 / T_1 = P_2 V_2 / T_2 \quad (1)$$

ここに、 $T_1 = 273 + t_1$ 、 $T_2 = 273 + t_2$ で与えられる絶対温度。

また、体積は $V_2 = V_1 \{1 + 3(\alpha \Delta t + \beta)\}$

α はコンクリートの線膨張係数で、 $10 \times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$

3.3 乾燥から湿潤へ移行の場合（Case study“A”）

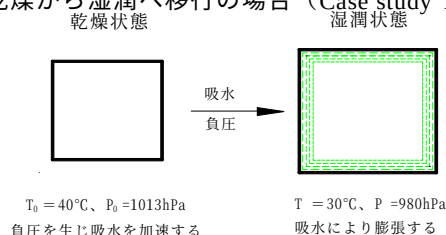


図 12 乾燥状態から湿潤状態に移行した場合のマトリックスの変化

3.4 湿潤から乾燥への移行の場合（Case study“B”）

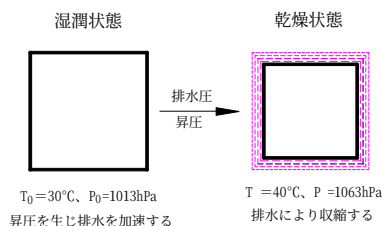


図 13 湿潤状態から乾燥状態に移行した場合のマトリックスの変化

3.5 ボイル・シャルル法による気泡内圧式の一般化

(1) 乾湿潤作用繰り返し作用に伴う体積変化

$$V_i = V_0 \left[1 + 3 \left\{ \alpha \sum_{i=1}^i \Delta t_i + 1/2 \{ (-1)^{i-1} + 1 \} \beta \right\} \right] \quad (2)$$

ここに、 α ：線膨張係数($10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)、 $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$ 、 β ：乾湿潤膨張係数($65 \times 10^{-6}/\%$)

(2) 乾湿潤繰り返しに伴う内圧変化

球殻内圧一般式 ($\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$)：

$$P_i = (273 + t_i) / (273 + t_{i-1}) \cdot P_0 [1 - 3 \{ \alpha \Delta t_i + (-1)^{i-1} \cdot \beta \}] \quad (3)$$

球殻内増加圧一般式 ($\Delta P = P_i - P_0$)

$$\Delta P_i = P_0 \left[(273 + t_i) / (273 + t_{i-1}) \cdot [1 - 3 \{ \alpha \Delta t_i + (-1)^{i-1} \cdot \beta \}] - 1 \right] \quad (4)$$

4. 表面保護剤塗布による効果

4.1 湿潤膨張試験

図 14 に各種結合材コンクリートに関し、中性化防止剤(表面保護剤)の有無の影響を示す。不可避免的な透水を遮断するため塗布により変形量を 1/3 程度に抑制し、表面劣化を防止できることを示している。

試験は $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}$ モルタル供試体($W/C=55\%$)を製作、7 日間の水中養生の後、2 日間気中養生、そして炉乾燥を行い、その後、湿度 80% の恒温室(室温 20°C)・水中浸漬を 24 時間ごとに繰り返し環境条件を変化させ、モルタル供試体の膨張・収縮を測定した。

24 日経過時点で絶乾状態にし、表面保護剤として中性化防止剤を塗布し、恒温室、水中浸漬を繰り返した。その結果、表面保護剤を塗布しなかった場合に付いては伸び変化が 300×10^{-6} 程度になり、クラックが発生する伸び能力を超えているが塗布した場合は $100 \mu\text{m}$ となり、伸び能力以内である。

表面保護剤に使用した中性化防止剤は含浸性のものでマトリクス表面から 3~4mm 内部に防水層を形成するものである。また、超微粉末高炉は微粉末の高炉スラグでブレン値 $8000 \text{ cm}^2/\text{g}$ のものである。

4.2 ペイント、はっ水剤塗布による表面保護の効果

環境条件によりコンクリートマトリクスは常に過酷な自然条件にさらされている。コンクリートの劣化要因の一つに乾湿潤作用や凍結融解作用による水分のマトリクス内外への浸入ならびに排出があげられる。そこで、マトリクス表面に表面保護工を施した場合の変化に付いて基礎的に検証した。

表面保護剤塗布、無塗布供試体にて、水中(20°C)—乾燥(50°C)—水中(20°C)—凍結(-18°C)—水中(20°C)を 12 時間サイクルごとに行った状態を図 15 に示す。ここで Blank に示す無塗布に付いては吸排水による質量変化が 4%~8% と大きい、はっ水剤塗布による質量変化は小さい。

ペイント塗布分に付いて、図 16 に示す供試体表面に直径 6 mm 程度の水泡のようなものが数箇所発生した。マトリクス内の水分が排出しようとするがペイントに阻止され、水泡となって現れた。

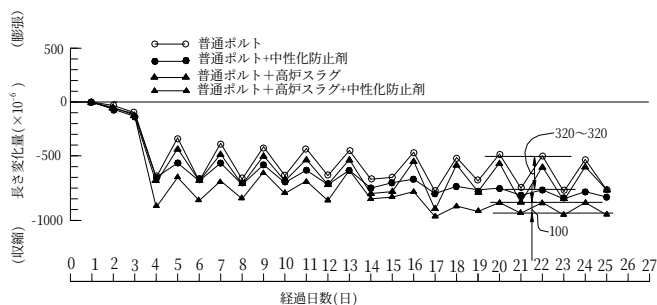


図 14 恒温室における乾燥・湿潤繰り返しによる長さ変化率

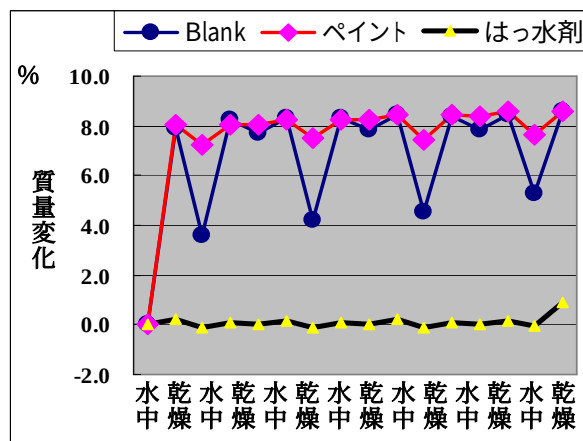


図 15 表面保護剤塗布による吸水変化



図 16 水中浸漬後のペイントの状況

5. まとめ

年間変位量、長さ変化率は温度、湿度、水分に大きく左右され夏季に膨張し、冬季に収縮するだけではなくさまざまな複合要因が作用してくる。また、環境の変化で常にコンクリートマトリクスは膨張・収縮を繰り返し、その都度、水分の浸入・排出が繰り返され、劣化に至っていることから表面保護工の有効性がわかった。

6. 参考文献

- 1) 長谷川光弘・徐 銘謙・須藤 誠・木田哲量・加藤清志：凍結融解および乾湿潤作用下における微小水循環効果によるコンクリートの中性化促進に関する研究、土木構造・材料論文集、21、73-80 (2005)。