

論文

[1070] マッシブなコンクリートの乾燥収縮に関する研究

春山信人*¹ 加藤常夫*² 金谷淳二*³ 篠田佳男*⁴

1. はじめに

マッシブなコンクリートは、初期に断面内に蓄積されるセメントの水和熱により膨張し、内部温度の低下に伴い収縮する。また、長期的見地からは、コンクリート部材の暴露面から、セメントの水和に不必要となった水（自由水）が逸散し、乾燥収縮の作用を受ける。このようにコンクリートに体積変化を及ぼす要因は、初期の温度応力によるものと、長期の乾燥収縮によるものが支配的であり、これらの要因がRC部材のひびわれ発生の原因であるというのが一般論である。しかしながら、マッシブなコンクリートの体積変化に関する研究は、初期の温度応力に関するものが主で、長期物性に関する研究が不足しているように思われる。

本研究は、これらの背景を考慮し、マッシブなコンクリートの長期における体積変化に着目し、大断面コンクリートの乾燥収縮、内部の水分移動に関する一連の実験的なアプローチを行い、マッシブなRC部材の長期変形挙動を精度良く推定する上で、信頼性の高い知見を得ることを目的としたものである。なお本報告は、屋外の自然環境下に放置した屋外暴露試験体と、恒温恒湿室内に設置した室内暴露試験体から得られた乾燥収縮ひずみに着目して検討を行ったものである。

2. 実験概要

2. 1 試験体形状

試験体は、図-1に示すように180×60×30cmの形状のものを2体作製し、1体を屋外暴露養生、1体を恒温恒湿室内（温度：20℃、湿度60％）での室内暴露養生に供した。型枠材には厚さ3mmのステンレスを使用し、型枠面からの水分逸散の防止と、型枠面とコンクリートとの摩擦抵抗の低減を配慮し、内面全体に粘性の強い油脂を塗布し、コンクリートの保護を施した。養生は、屋外・室内暴露試験体共、打設から材令7日まで試験体周囲に厚さ20cmの断熱材を配置し、材令7日～28日までは上面の断熱材を取り外し、湿潤状態を保ちながら一面放熱で断面内温度が一定となるように湿布養生を行った。材令28日以降は気中養生とし、屋外・室内それぞれの場所に暴露した。

実験は、試験体内にA-A、B-B、C-Cの3断面を設定し、1断面につき暴露面か

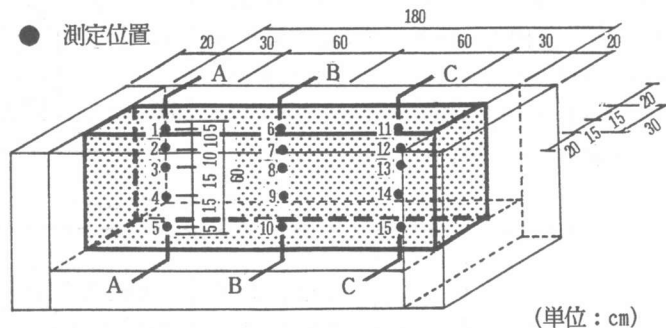


図-1 試験体形状

- * 1 前田建設工業(株) (正会員)
- * 2 東京電力(株)
- * 3 東京電力(株) (正会員)
- * 4 前田建設工業(株) (正会員)

ら 5cm, 15cm, 25cm, 40cm, 55cm の 5 点、計 15 点それぞれに熱電対、埋め込み型ひずみ計、ステンレス製の水分計を埋め込み、熱電対によりコンクリート温度を、ひずみ計によりひずみを、水分計によりコンクリート湿度を測定した。この水分計の原理は、コンクリート中に埋め込まれたステンレス製の電極間の抵抗と水分との間に相関関係があることを利用し、その抵抗変化を計測するものである。

また、マス試験体との比較用に長さ変化用標準供試体 (10×10×40cm) を作製し、長さ変化量、重量変化量の測定に供し、かつ、ひずみ計、水分計の有意性を把握するため、標準供試体にそれぞれを埋め込んだものも併せて作製した。

2. 2 コンクリート

本実験に使用したコンクリートの使用材料を表-1 に、調合条件及び調合表を表-2 に、コンクリートの基礎物性を表-3 に示す。コンクリートは、結合材としてセメントの内割りでフライアッシュを 20% 混入する、フライアッシュセメント B 種相当のものを使用した、設計基準強度が材令 91 日で 330kgf/cm²、ベースコンクリートのスランプが 12cm の調合で、実機 (3 m³ 練り強制 2 軸ミキサ) により練り混ぜ、試験体打設時にトラックアジテータ車中のコンクリートに流動化剤を後添加し、スランプ 18cm の流動化コンクリートとした。また、屋外暴露試験体と室内暴露試験体は、それぞれ別のトラックアジテータ車より試料を採取している。

コンクリートの基礎物性は表-3 に示すように、屋外用でベースコンクリートスランプ 12.0cm、流動化剤添加後 17.0cm、室内用でベースコンクリートスランプ 13.2cm、流動化剤添加後 20.5cm、空気量は屋外・室内用共 3.6~4.0% と、フレッシュ性状は計画通りであった。力学的性質は、屋外用が材令 91 日で圧縮強度 459kgf/cm²、ヤング係数 3.62×10⁵kgf/cm²、材令 1 年で圧縮強度 480kgf/cm²、ヤング係数 3.89×10⁵kgf/cm²、室内用で材令 91 日で圧縮強度 423kgf/cm²、ヤング係数 3.79×10⁵kgf/cm²、材令 1 年で圧縮強度 514kgf/cm²、ヤング係数 3.99×10⁵kgf/cm² であった。

表-1 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント 比重: 3.16
フライアッシュ	J 火力発電所製 比重: 2.07
細骨材	S 川 N 地区産川砂及び陸砂
粗骨材	S 川 N 地区産 25mm 川砂利
AE 減水剤	リガニンスルホン酸化合物・リオール複合体
流動化剤	メタミンスルホン酸系化合物

表-2 調合および調合条件

調 合 条 件						
G max (mm)	スランプ (cm)		空気量 (%)		W/(C+F) (%)	S/a (%)
25	12		4.0		43.8	41.3
単 位 量 (kg/m ³)						A E 減水剤 (cc/m ³)
水 (W)	セメント (C)	フライ アッシュ (F)	細骨材		粗骨材	
			川砂	陸砂	川砂利	
165	302	75	500	214	1063	
						943

表-3 基礎物性

		フレッシュ性状			力 学 的 性 質							
		スランプ (cm)	空気量 (%)	温 度 (°C)	圧 縮 強 度 (kgf/cm ²)				ヤング係数 (×10 ⁵ kgf/cm ²)			
					28 日	91 日	6 ヶ月	1 年	28 日	91 日	6 ヶ月	1 年
屋 外 暴露用 コンクリート	流動化前	12.0	3.9	21.5	370	459	467	480	3.27	3.62	3.83	3.89
	流動化後	17.0	4.0	22.5								
室 内 暴露用 コンクリート	流動化前	13.2	3.6	19.0	366	423	470	514	3.29	3.79	3.77	3.99
	流動化後	20.5	3.6	21.0								

3. 実験結果及び検討

3. 1 コンクリートの熱線膨張係数

屋外に暴露した試験体は、外気温の影響をそのまま受けることとなり、温度変化に伴うひずみを考慮する必要がある。ここでは、セメントの水和熱により断面内での温度変化が大きい材令28日までのデータに基づいて、コンクリートの熱線膨張係数を求める。

図-2は、代表的なものとして、暴露面から5cm、25cm、55cmの位置において、A-A断面、B-B断面、C-C断面の断面におけるコンクリート温度とひずみの関係を示したものである。これらの間には暴露面からの距離、また、断面位置が異なっても特徴的な挙動を示すことなく、ほぼ同様な関係が認められる。例えば試験体に外部、あるいは内部拘束の存在を考えると、応力ひずみを生じることとなる。その場合コンクリート温度とひずみの関係は、高温状態でひずみのスリップが、また、温度降下領域で勾配に差が生じたり、小さな勾配となる現象を伴う。しかし、そ

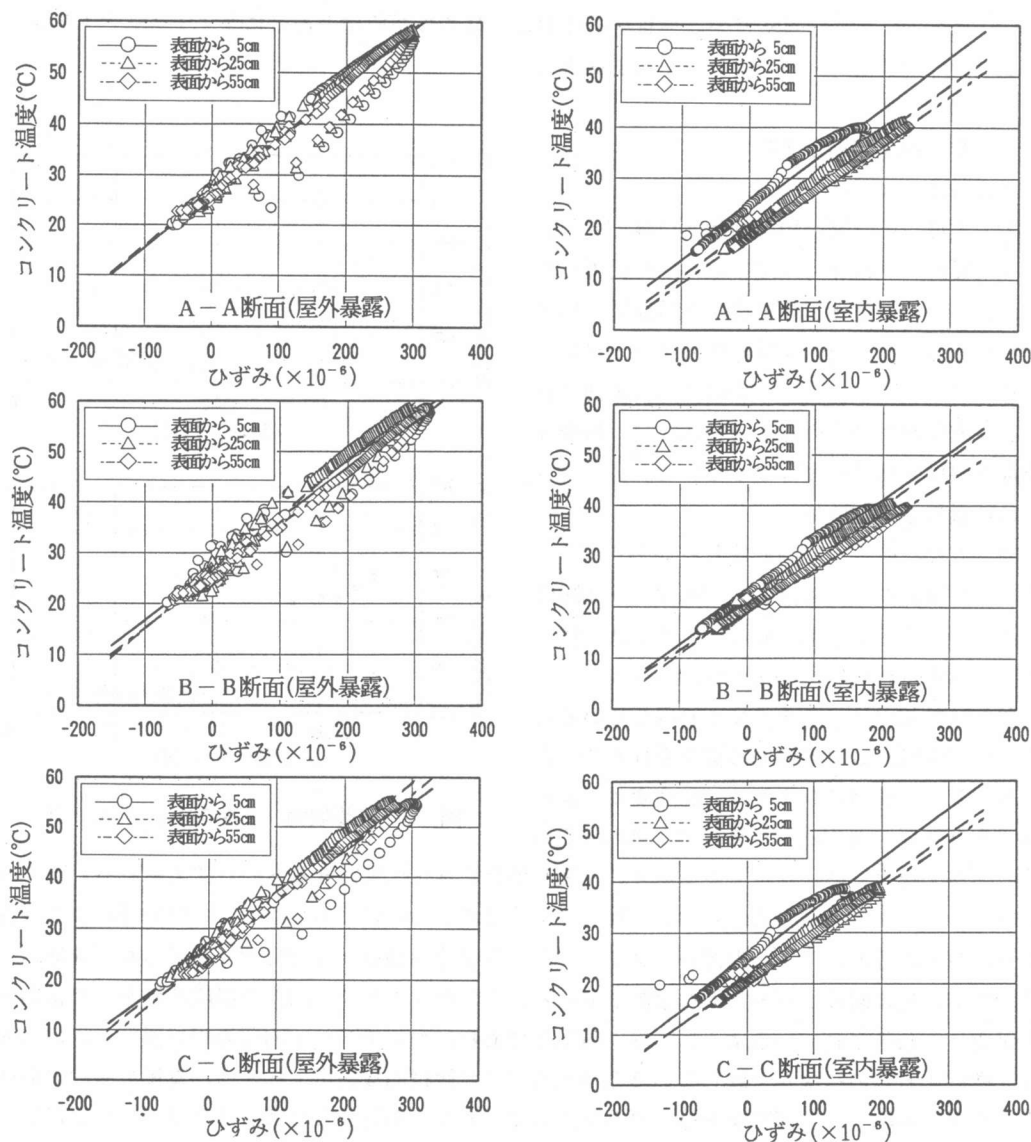


図-2 ひずみと初期コンクリート温度の関係

のような現象を認めることはできず、屋外、室内暴露を含め、全測定箇所における熱線膨張係数を算定した値を表－４に示す。屋外暴露および室内暴露試験体ともバラツキが小さく、 $10 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ に近い値を示している。また、これらの値は温度応力の解析で一般的に利用されている熱線膨張係数と一致している。

これらは、今回使用している試験体が拘束効果による影響が小さく、かつ、マッシブなコンクリートの体積変化としての乾燥収縮の問題を取り組む上で、十分質の高い情報を得られることを示唆している。なお、熱線膨張係数は、材令の長期化とともに変化することも考えられるが、今回の検討においては一定値を採用した。

表－４ 線膨張係数測定結果

暴露面からの距離	室内暴露			屋外暴露		
	A-A	B-B	C-C	A-A	B-B	C-C
5cm	10.0	9.5	10.0	10.8	10.2	9.8
15cm	9.3	9.6	10.2	11.2	10.3	10.1
25cm	9.6	9.7	9.5	10.8	11.3	11.0
40cm	9.6	9.2	9.5	10.8	10.2	10.9
55cm	9.4	8.4	9.1	10.8	10.3	10.3
	平均		9.5	平均		10.6
	変動係数		4.5%	変動係数		4.2%

(単位： $\times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$)

3. 2 乾燥収縮ひずみ

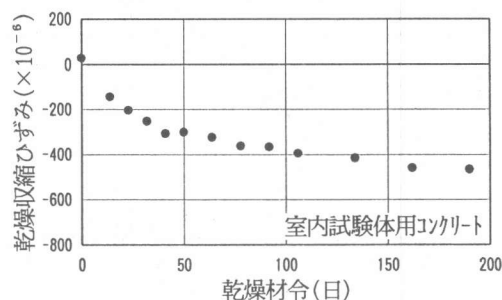
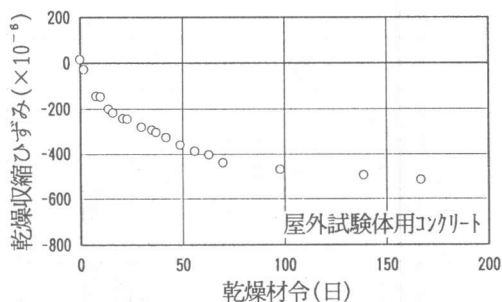
(1) 標準供試体

図－３は、屋外暴露用試験体（以降：屋外）と室内暴露用試験体（以降：室内）に使用したコンクリートの乾燥収縮を標準供試体について示したものである。乾燥収縮は屋外用が材令３カ月で 450×10^{-6} 、材令６カ月で 500×10^{-6} 程度、室内用が材令３カ月で 400×10^{-6} 、材令６カ月で 450×10^{-6} 程度となっている。

(2) 屋外暴露試験体

図－４は、屋外と室内にけおるコンクリートのひずみ履歴をA-A断面、B-B断面、C-C断面について比較したものである。ここでは、初めに屋外暴露試験体についての検討を行う。

屋外は外部環境下にそのまま暴露していることから、当然、気象条件の影響を受けることとなる。そこで縦軸のひずみは、温度変化によるひずみを内部に埋め込んだ熱電対と熱線膨張係



図－３ 乾燥収縮ひずみの履歴(標準供試体)

数の関係を用いて補正したものであり、乾燥収縮ひずみを代表できるものと考えられる。乾燥収縮ひずみは、１年を通じ値が０付近で横ばい状態にあることが認めらる。これは乾燥により表面から自由水が逸散しても、内部コンクリートからの水分の補給、また降雨・雪があれば逸散した自由水が容易に回復されることを示唆している。またコンクリート内部の湿度を計測した椎名らの研究¹⁾で報告されているように、屋外環境下であればコンクリート内部の相対湿度がほぼ 100%で推移するとの結果と一致しているといえる。なお微視的な観点でみると、夏場で室内試験体より大きな勾配で、一部乾燥収縮ひずみを生じていることが認められる。これは、外気温が高く、かつ、晴天が続いた空梅雨といわれた時期に相当する。

屋外環境下におけるコンクリートの乾燥収縮は、このようなことから外部の気象条件の影響を受けるものの、ひびわれや変形の問題となるような値まで増大しないことが確認された。

(3) 室内暴露試験体

恒温恒湿室内環境下の試験体（以降：室内）は、当然、暴露面に近いほど乾燥収縮ひずみの値は大きいものの、乾燥材令 450日を経過した現在でも暴露面から 5cm位置で 250×10^{-6} 以下と小さく、その増大程度が非常に緩慢となっている。また、測定断面で比較すると、暴露面からのそれぞれの深さにおいては優位となる差は認められず、暴露面から25cmの深さでは、 100×10^{-6} 以下と小さいものとなっている。

次に断面内のひずみ分布を 100日、200日、300日、400日について示すと図-5の通りである。ひずみ分布は一部非線形となっているものの全体的にみれば強い線形関係が認められる。とりわけ試験体端部から30cmの距離になるA-A断面は、ひずみ分布が線形となっているといえる。これは試験体自体、外部拘束を受けるような構造となっておらず、かつ、内部拘束によるひずみの非線形関係が小さいことから、ここで示したひずみが無拘束の乾燥収縮ひずみを代表していることを示唆している。

マッシュパなコンクリートは、このように暴露面に近くても標準養生供試体に比べかなり小さく、さらに内部では極めて小さい値となっている。これは、暴露面から内部に向かうとコンクリートの湿潤状態が保持され、かつ、表面から自由水が逸散し、細孔の水が抜けようとしても内部から

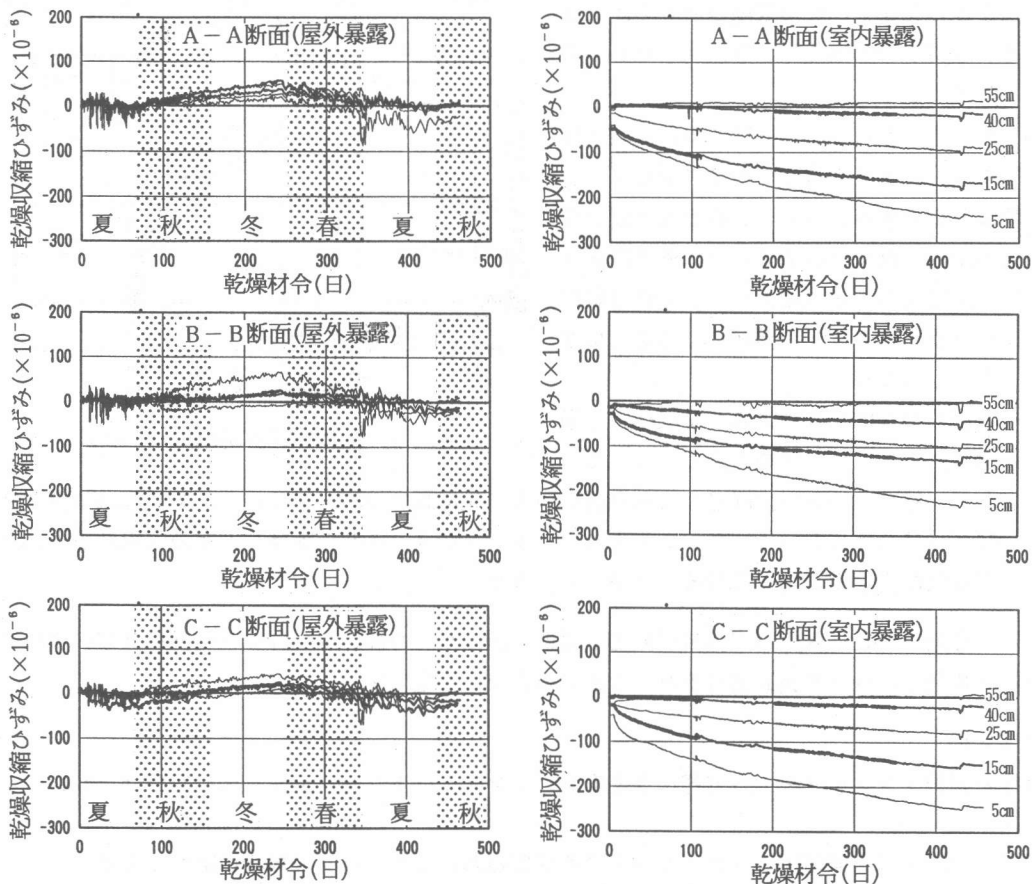


図-4 乾燥収縮ひずみの履歴（マス試験体）

水の補給がなされているものと思われる。また、コンクリートの乾燥が毛細管張力理論²⁾によるものとすれば、マッシブなコンクリート部材では細孔への水の補給により、細孔部分の表面張力が断面の小さいものほど大きくならず、乾燥収縮の増加がより緩慢になり、実験結果との整合性が理解できる。そのため長期的に考えても、最終的な乾燥収縮量も標準供試体に比べ小さくなるものと推定される。

4. 結論

本研究は、マッシブなコンクリートの乾燥収縮を実験的検討を主に取り組んだものである。この結果、以下に示す結論を得た。

- ① 大断面コンクリート部材での実験は、内部拘束や外部拘束等の拘束ひずみによる影響が考えられるが、本実験における温度とひずみの関係や、乾燥収縮ひずみの断面分布から得られた情報は、無拘束に近いものと推定できる。
- ② 屋外の外部環境下に暴露された試験体は、気象条件による影響をそのまま受けるが、乾燥収縮ひずみをみると、ほとんど値の変動が認められない。そのため、直接降雨・雪の影響を受ける環境下では、乾燥収縮によりひびわれや変形が問題となることはないものと思われる。
- ③ 恒温恒湿室内に暴露された試験体は、暴露面に近づくにつれ値を大きくしている。

しかし、材令 450 日以上経過しても暴露面から 5cm 位置で 250×10^{-6} 以下、更に 25cm 位置では 100×10^{-6} を下まわっていた。このようにマッシブなコンクリートは、一定の乾燥環境下においても乾燥収縮量が小さくなることが認められた。

なお今回は、乾燥収縮ひずみの現象を主に取り扱った。今後、水分計のデータを詳細に検討を行い、乾燥収縮機構や長期的な予測も含めて報告する予定である。

参考文献

- 1) 椎名国雄：コンクリートの内部湿度と変形、コンクリートジャーナル、Vol. 7, No. 6, pp. 1-11、1969. 6
- 2) 長滝重義・米倉亜州夫：コンクリートの乾燥収縮およびクリープの機構に関する考察、コンクリート工学、Vol. 20, No. 12, pp. 85-95、1982. 12

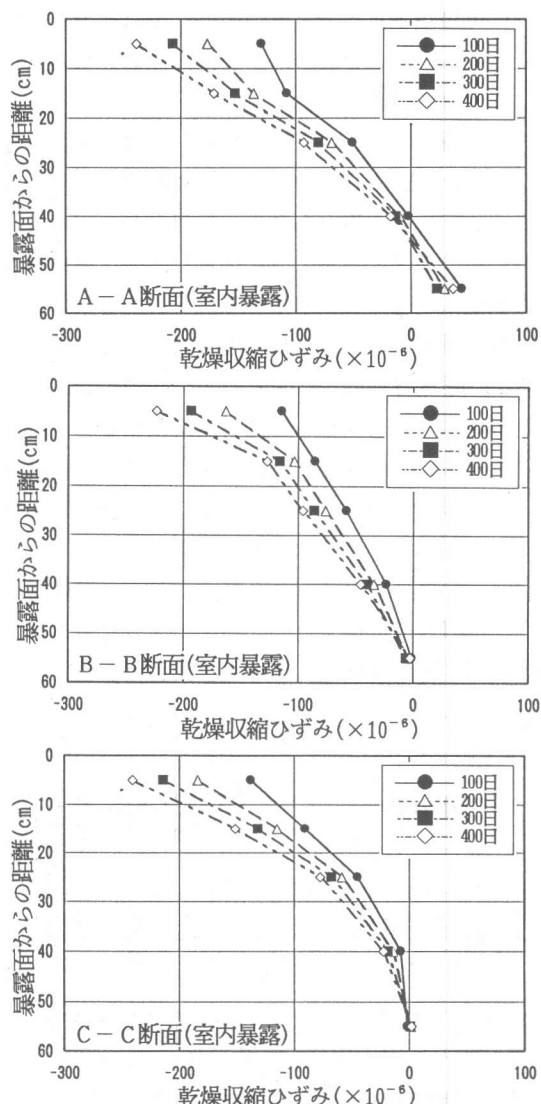


図-5 断面内の乾燥収縮ひずみの分布