

論文 中庸熱セメントを用いたモルタルおよびコンクリートの含水率分布に関する基礎研究

吉岡 昌洋^{*1}・樋渡 健^{*2}・松田 拓^{*3}・柳田 淳一^{*4}

要旨：中庸熱ポルトランドセメントを用いたコンクリートにおいて、乾燥開始時期が表層コンクリートの品質に及ぼす影響を明らかにするために、表層からの水分逸散による乾燥と含水率の係に着目し、部材をモデル化した供試体における含水率分布測定および厚さの異なる供試体による質量減少率測定を実施した。その結果、使用セメント種別や水セメント比について乾燥開始時期の差異による傾向を捉えた上で、乾燥開始時強度が含水率分布傾向と密接な係にあることが確認された。

キーワード：中庸熱ポルトランドセメント、乾燥開始時期、含水率分布、質量減少率

1. はじめに

近年、コンクリートのひび割れ抑制や高強度コンクリートへの対応等を目的とし、建築工事にて中庸熱ポルトランドセメントを使用する事例が増加しつつあり、中庸熱セメントを用いたコンクリートの品質へ及ぼす初期乾燥の影響についても種々の研究がなされている^{1),2)}。

コンクリートは一般に初期乾燥を受けない程、表層部の細孔構造が緻密化し、表面からの水分の逸散は緩慢となる事が予想される。しかしながら、材齢初期に乾燥を受けることで、水和反応が阻害されて圧縮強度や耐久性等の品質へ影響を及ぼすことが懸念される。

一方、普通ポルトランドセメントや早強ポルトランドセメントは、圧縮強度が 10N/mm^2 以上得られたことを確認して湿潤養生を打ち切れば、十分な湿潤養生を施した場合と比較して、強度発現性や耐久性が特に劣らないことは経験上知られている³⁾。しかし、表層コンクリートの品質についての規格試験方法や、基準値がないこともあり、中庸熱セメントを用いた場合の乾燥の影響が必ずしも明確ではない。

本報では、中庸熱セメントを用いた場合に乾

燥開始時期の違いが表層コンクリート品質にどのような影響を与えるかを把握するため、水分の逸散に着目した実験を行なった結果と得られた知見を報告する。

2. 実験概要

2.1 実施概要とその目的

本研究では以下の2ケースの実験を実施した。

- 1) モルタル含水率分布測定試験（実験 A）：コンクリート部材のモデル化供試体にて、乾燥面からの深度毎に質量含水率を測定し、表面から乾燥する場合に、乾燥開始時期が含水率分布にどのような影響を与えるかを検討した。
- 2) 厚さの異なる供試体による質量減少率試験（実験 B）：厚さのみを変えた供試体にて、乾燥開始時期に伴う質量変化量（水分逸散量）を測定し、その経時変化について検討した。

2.2 実験要因と水準

実験 A, B それぞれの実験要因と水準を表-1に示す。供試体作製に用いたコンクリート試料、乾燥開始材齢および試験環境は両実験にて共通要因とした。コンクリートの調合および使用材料は表-2の通りである。調合は、目標スランプ

*1 (株) 長谷工コーポレーション 技術研究所 工修 (正会員)

*2 東亜建設工業 (株) 技術研究開発センター (正会員)

*3 三井住友建設 (株) 技術研究所 工修 (正会員)

*4 大木建設 (株) 建設本部建設技術部 (正会員)

18cm, 空気量 4.5%とし, 単位水量は調合により異なり 175~184kg/m³の範囲とした。また, 試料に用いたモルタルは, コンクリートを 5mm ふるいでウェットスクリーニングして得られたものとした。各実験における調合種別と乾燥開始時期の一覧表を表-3に, その記号を表-4示す。

2.3 試験方法

(1) モルタル含水率分布測定試験 (実験A)

厚さ 40cm の部材の乾燥状態をモデル化し, 10×10×40cm の小口部分 (□10×10 cm) の両端面を乾燥面とし, 乾燥面からの深度毎に材齢 28 日の質量含水率分布を乾燥質量法にて測定した。

供試体の概要を図-1に示す。

なお, 試験手順は以下の通りである。

- 1)モルタル試料にて 10×10×40cm の供試体を各水準で 1 体ずつ作製した。また, 打込み上面はシートで覆い水分の逸散を防止した。
- 2)所定の材齢で型枠を脱型し, 両端面を開放し, その他は封かん状態として温度 20℃, 湿度 60%RH の環境下で乾燥を開始した。
- 3)材齢 28 日にて所定の位置で無水状況下にて割裂切断し, 1 供試体から 10 試験片を採取した。
- 4)採取試験片の質量測定後, 105℃の乾燥炉で乾燥して絶乾質量を測定し, 質量含水率を求め, 試験片中心位置における含水率とした。

(2) 厚さの異なる供試体による質量減少率試験 (実験B)

厚さ t (=奥行き) の異なる供試体を作製し, 乾燥開始材齢を変えて一定環境下で乾燥させ, 乾燥期間に伴う質量減少量を測定した。供試体の概要を図-2に示す。

なお, 試験手順は以下の通りである。

- 1)10×40cm の寸法で, コンクリートは厚さ 2.5~20.0 cm の 4 種, モルタルは厚さ 1.25, 2.5 cm の 2 種の供試体を作製した。また, 打込み上面はシートで覆い水分の逸散を防止した。供試体数は 2 体とし, 厚さ 20.0cm のみ 1 体とした。
- 2)所定の材齢経過後に型枠を脱型して, 直ちに質量を計測した。
- 3)10×40cm の 1 側面のみを開放し, その他の面

表-1 実験要因と水準

要 因		水 準
実験A,B 共通	セメント種別	普通ポルトランドセメント(N) 中庸熱ポルトランドセメント(M)
	水セメント比	Nのケース:55%, Mのケース:45,55%
	乾燥開始材齢	1, 2, 4, 7日
	試験環境	温度:20±1℃, 湿度:60±3%RH
実験A	試験片採取位置 (乾燥面からの距離)	1) 0~2.0cm 2) 2.0~4.0cm 3) 4.0~6.0cm 4) 9.0~11.0cm 5) 18.0~20.0cm
	含水率測定時期	材齢28日
実験B	試験体の厚さ	モルタル :1.25,2.5 cm コンクリート:2.5,5.0,10.0,20.0 cm
	含水率測定時期	乾燥期間 :1,2,4,7,14,28,56,91日

表-2 コンクリートの調合と使用材料

調合種別	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
			C	W	S	G	Ad
N 55	55.0	47.0	324	178	827	946	3.24
M 55	55.0	47.6	318	175	845	946	3.18
M 45	45.0	44.6	409	184	749	946	4.09

C: N=普通ポルトランドセメント(密度3.16g/cm³) (T社製)

M=中庸熱ポルトランドセメント(密度3.21g/cm³) (T社製)

W: 工業用水及び上澄水

S: 鹿島産砂(表乾密度2.59g/cm³吸水率2.35%)と鹿沼産砕砂(表乾密度2.62g/cm³吸水率1.98%)を容積比7:3で混合

G: 鹿沼産2005砕石(表乾密度2.64g/cm³, 吸水率0.96%)

Ad: AE減水剤 (F社製)

表-3 実験水準一覧表

		乾燥開始材齢 (日)			
		1	2	4	7
調合種別	N 55	A	A・B	A	A・B
	M 55	A・B	A・B	A・B	A・B
	M 45	A	A・B	A	A・B

表-4 試験要因記号一覧表

		乾燥開始材齢 (日)			
		1	2	4	7
調合種別	N 55	N55-1d	N55-2d	N55-4d	N55-7d
	M 55	M55-1d	M55-2d	M55-4d	M55-7d
	M 45	M45-1d	M45-2d	M45-4d	M45-7d

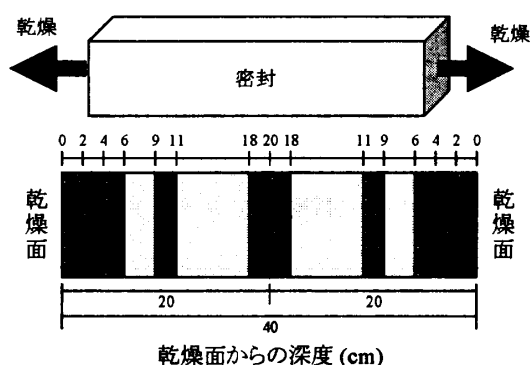


図-1 含水率分布測定試験 供試体概要

は封かん状態として実験 A と同一環境下で乾燥を開始した。

4) 乾燥期間 1, 2, 4, 7, 14, 28, 56 および 91 日で質量を測定し、質量減少率を求めた。

5) 材齢 91 日の測定後、105℃の乾燥炉で乾燥して絶乾質量を求め、試験体毎に材齢 91 日における質量含水率を求めた。

3. 実験結果および考察

3.1 試験コンクリートおよびモルタルの品質

両試験に用いたコンクリートおよびモルタル試料の品質は以下の通りである。

(1) フレッシュコンクリート試験結果

試験に供したコンクリートのフレッシュコンクリート試験結果は表-5 の通りである。

(2) 圧縮強度試験結果

標準養生 28 日および乾燥開始時の圧縮強度試験結果を表-6 に示す。ここでの乾燥開始時圧縮強度は、封かん養生円柱供試体強度とした。

3.2 モルタル含水率分布測定試験（実験 A）

材齢 28 日における乾燥面からの深度（試験片中心位置）と含水率の関係を図-3 に示す。

全ての調合において、乾燥開始時期が早い程含水率は小さな値を示し、その傾向は供試体中

心近傍においても観察されるが、表面近傍程顕著であった。また、乾燥開始時期および表層からの深度が同一の場合の含水率は、N55 が最も大きく、M55 が最も小さい傾向にあり、使用セメントや水セメント比により異なる値を示した。

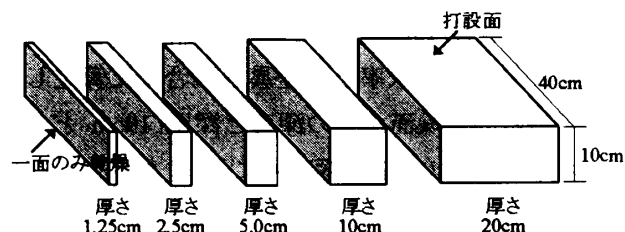


図-2 質量減少率試験 供試体概要

表-5 フレッシュコンクリート試験結果

調合種別	スランブ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (℃)
N 55	18.5	4.7	22.0
M 55	19.5	3.7	23.0
M 45	17.0	3.9	25.0

表-6 圧縮強度試験結果

調合種別		乾燥開始時圧縮強度 (N/mm ²)				標準28日 (N/mm ²)
		1d	2d	4d	7d	
N 55	モルタル	4.63	10.9	19.2	26.2	33.5
	コンクリート	4.52	9.52	16.6	22.2	33.8
M 55	モルタル	4.24	7.26	13.1	17.8	26.7
	コンクリート	4.25	6.53	11.6	14.0	25.4
M 45	モルタル	5.94	12.2	19.8	26.5	40.4
	コンクリート	5.89	10.9	16.8	22.3	40.2

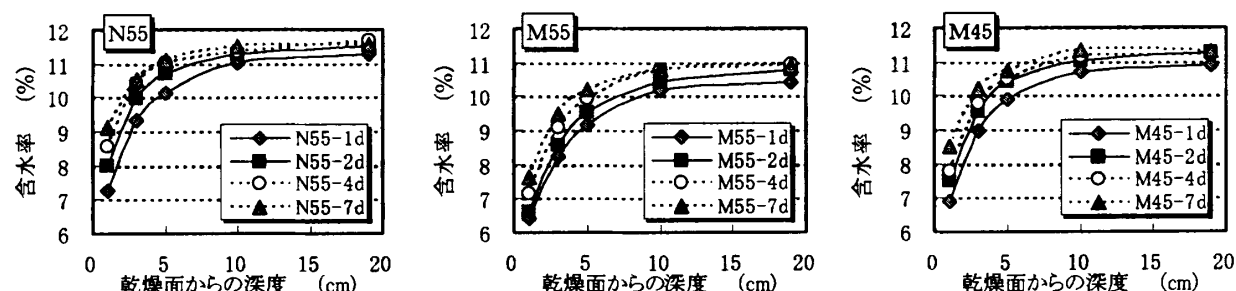


図-3 含水率の分布測定結果

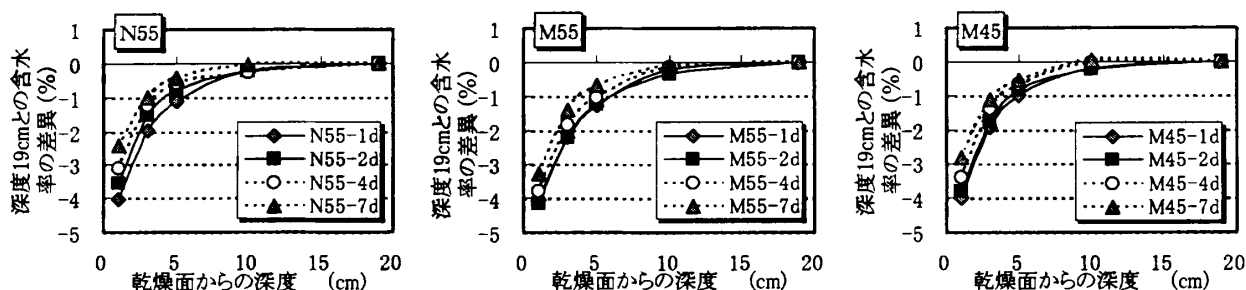


図-4 乾燥面からの深度と深度19cmとの含水率差異の関係

なおこれには、単位水量の影響も含まれている。試験に供したコンクリート調合間での単位水量は最大で $9\text{kg}/\text{m}^3$ 異なるが、これをモルタル含水率に換算すると約 1.0% の差異となる。

次に、含水率分布状況を調合別に比較するために、乾燥の影響を受けにくい供試体の中心部近傍（深度 19cm）の含水率を基準として、各深度における含水率との差異を調合毎に算定した。その際の乾燥面からの深度と深度 19cm との含水率差異との関係を図-4 に示す。乾燥開始材齢 1 日の場合、表層付近の深度 1cm は、深度 19cm よりも 4% 程度小さな含水率を示し、これは調合に因らずほぼ一定であった。また、全ての調合において、乾燥開始時期が遅くなる程含水率差異は小さくなるが、その程度は、調合によって異なり、乾燥開始材齢 7 日における深度 1cm での含水率の差異は N55 で約 2.4%, M55 で 3.3%, M45 で 2.8% であった。この様な調合による違いは、深度が浅い程顕著であった。

次に、乾燥開始時圧縮強度と深度 19cm との含水率差異の関係を図-5 に示す。調合によらず乾燥開始時の圧縮強度と含水率差異は、ほぼ一致していることが確認できる。また、乾燥開始時の圧縮強度が高い程含水率差異は小さくなる傾向がみられ、深度が浅い程その傾向は大きい。

各調合において乾燥開始時の圧縮強度が約 $5\text{N}/\text{mm}^2$ 、および約 $10\text{N}/\text{mm}^2$ とほぼ同等であったデータを抽出し、各深度における深度 19cm 含水率との差異を打点した、同一乾燥開始強度による比較を図-6 に示す。図に示す様に、乾燥開始時の圧縮強度が同程度であれば、使用セメントや水セメント比、乾燥開始時期が異なっても、含水率の差異はほぼ同一線上に打点された。したがって、供試体中の含水率分布の状態は、使用セメントや水セメント比の違いに因らず、乾燥開始時の圧縮強度の影響を大きく受けていることが考えられる。

今回の試験はモルタルを用いて実施した。この結果が実大部材の含水率分布を再現し、ほぼ相似していると考え、コンクリートを用い

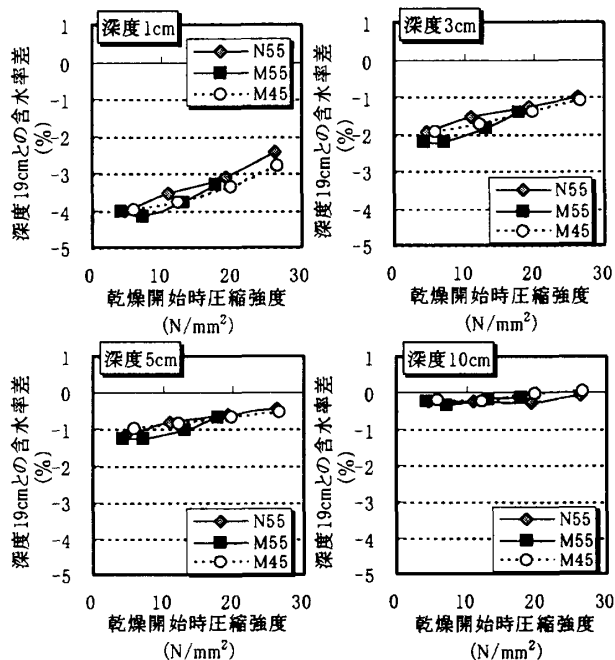


図-5 乾燥開始時圧縮強度と深度 19cm との含水率差異の関係

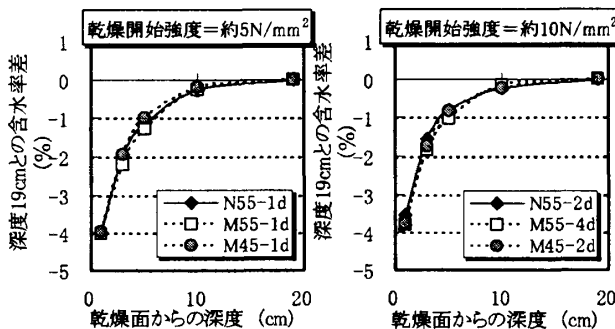


図-6 同一乾燥開始強度による比較

る実構造物では、単位容積中に占めるモルタル分が少ないことからセメント種別などが含水率分布に与える影響は比較的小さいと推察される。また、乾燥開始圧縮強度が高い程、含水率差異は小さくなる傾向が見られ、深度が浅い程その傾向は強い。つまり、セメント種別や水セメント比に関わらず、乾燥開始時の圧縮強度が含水率分布に大きく影響すると考えられる。

3.3 厚さの異なる供試体による質量減少率試験（実験B）

(1) 質量減少率と乾燥期間の関係

供試体の厚さ別のモルタルおよびコンクリート供試体の質量減少率と乾燥期間の関係を図-7 に示す。

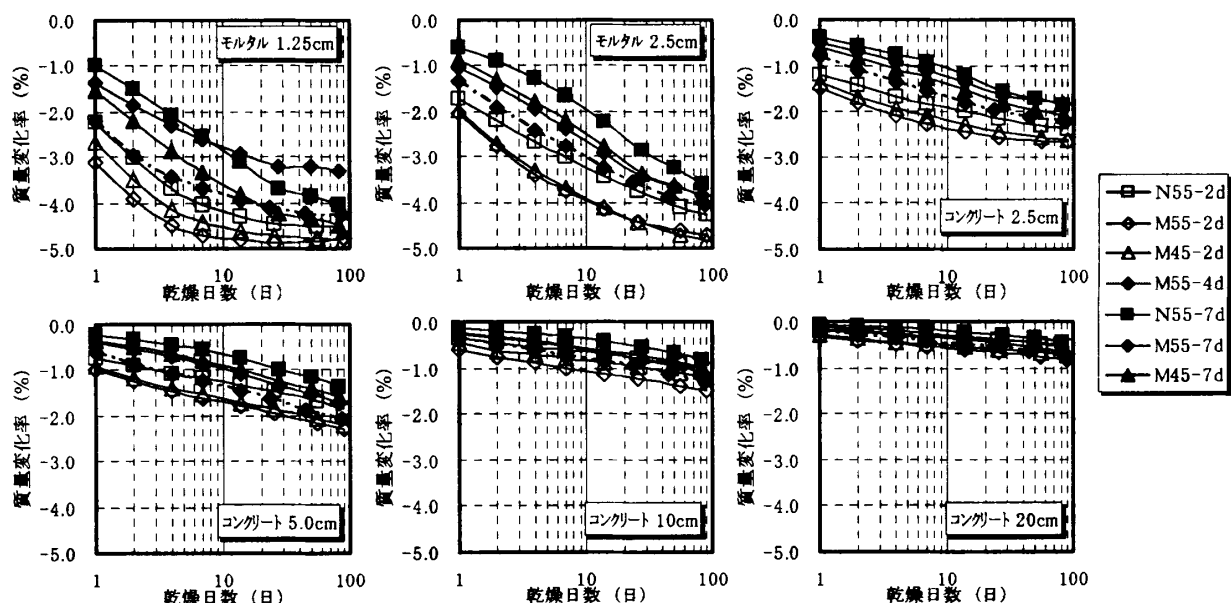


図-7 質量減少率と乾燥期間の関係

各調合において乾燥開始時期が早い程、質量減少率は大きくなる傾向にあり、その値は供試体の厚さが薄い程顕著であった。セメント種別については普通セメントよりも中庸熟セメントが、水セメント比については大きい程質量減少は大きくなった。

経時変化に伴う影響を考察すると、最も薄い厚さ 1.25cm の供試体の場合、乾燥開始材齢 2 日では、乾燥初期における質量減少の勾配が極めて大きく、乾燥日数 7 日程度でその勾配は明確に減少し、さらに乾燥日数 28 日程度でほぼ横這いとなった。一方、乾燥開始材齢 7 日では、初期の質量減少率は小さいが、なだらかに質量減少が進み乾燥日数 91 日でも減少傾向を示した。これは、乾燥開始材齢 2 日の場合、乾燥開始時のセメント水和率が低く、即ち、自由水量が多いために、初期に著しく水分が逸散し、乾燥 28 日程度で平衡状態に達したものと推察される。また、厚さ 2.5cm の供試体でもモルタルとコンクリートの違いによらず、乾燥速度こそ異なるが、ほぼ同様な傾向が見てとれる。一方、厚さ 5cm 以上では、上記の様な乾燥開始時期による明確な差異は認められない。

(2) 供試体厚さと単位質量変化量の関係

質量変化量を表面積体積比 S/V で除した値を単位質量変化量として算定し、M55 の乾燥開始

材齢 1 日と 7 日を例に取り、乾燥日数ごとに供試体厚さと単位質量変化量の関係を図-8 に示す。乾燥開始時期が早い程単位質量変化量は大きく、何れの乾燥日数においても供試体厚さと単位質量変化量には比例関係が見られた。なおこの傾向は、調合種別や乾燥開始時期に因らず、全てで同一であった。また、全供試体の乾燥面積は一定であるため、供試体厚さ t は体積表面積比 V/S に一致する。したがって、本条件下における単位質量変化量と体積表面積比 V/S には比例関係が成立していると考えられる。この結果は、各種実大形状部材での質量変化に伴う含水率検討での一助となるとと思われる。

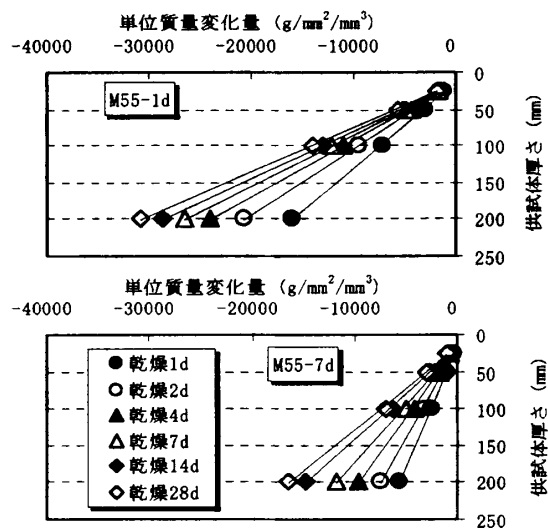


図-8 供試体厚さと単位質量変化量の関係

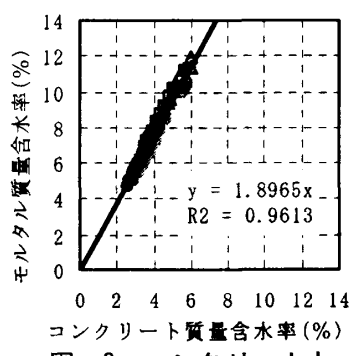


図-9 コンクリートと
モルタルの含水率比較

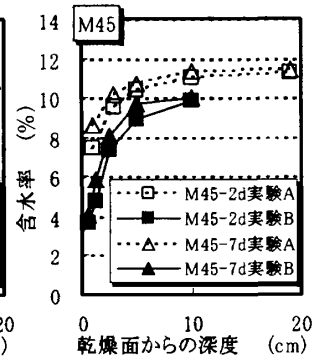
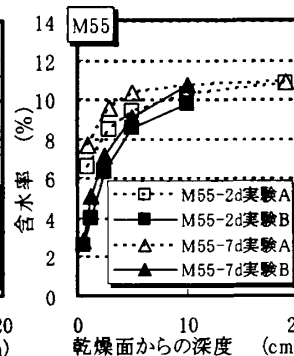
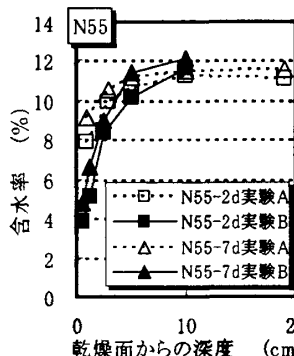


図-10 実験AとBの含水率比較

4. 実験Aと実験Bの結果比較

ここでは、実験A、Bにて得られた結果をモルタル含水率の尺度から比較する。

そこで、実験Bにおける材齢91日での乾燥法から求めた質量含水率と材齢28日から91日での質量減少量の関係から、材齢28日の質量含水率を推定した。次に、厚さ2.5cm供試体におけるコンクリートとモルタルの含水率の関係式を図-9のように求め、これを用いて厚さ5.0～20cm供試体のコンクリート含水率をモルタル含水率に換算した。さらに、供試体厚さの中心までの距離($t/2$)を乾燥面からの深度として取り扱い含水率分布を求めた。

上記にて算出した実験Bのモルタル含水率と実験Aの含水率の比較を図-10に示す。

いずれの要因においても、深度が浅い程実験Aと比較して実験Bの含水率は低くなる傾向を示したが、深度が10cm程度では、実験AとBの含水率は近似する傾向にあった。これは、実験Bにおける薄い供試体では起きえない深部から浅部への水分移動が、厚さ40cmの供試体を用いた実験Aでは生じたことによると考えられる。この結果、深度の浅い場合に実験AとBで含水率に大きな差異が生じたものと考えられる。

5. まとめ

中庸熱セメントを用いたコンクリートの含水率分布として、以下の知見を得た。

1) 乾燥開始時期が早いほど、コンクリート表面近傍の含水率の低下率は大きい。

2) 使用セメントや水セメント比に因らず、乾燥開始時の圧縮強度で含水率分布の傾向を捉えることが出来る。

3) 供試体厚さが薄い場合、乾燥開始時期が早い程乾燥速度が速い。厚さ5cm以上では、乾燥開始時期と乾燥速度に明確な関係は認められない。

4) 単位質量減少量と体積表面積比 V/S は比例関係にある。

今後、水和率や細孔構造が含水率に与える影響や実大部材での含水率分布が圧縮強度や硬化物性に与える影響について検討する予定である。

なお、本研究は安藤建設、大木建設、西武建設、銭高組、大末建設、鉄建建設、東亜建設工業、東洋建設、長谷工コーポレーション、三井住友建設の10社による共同研究である事をここに示す。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、ご指導下さいました宇都宮大学の樹田佳寛教授には、厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 池尾他：セメント種類と養生期間がコンクリートの中性化に及ぼす影響，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1, pp.465～466, 2001.9
- 2) 太田他：せき板存置期間が中庸熱ポルトランドセメントを用いた高強度コンクリートの強度性状と耐久性に及ぼす影響，日本建築学会構造系論文報告集 No.589, pp.7-14, 2005.3
- 3) 和泉他：せき板の存置期間および初期養生が構造体コンクリートの品質に及ぼす影響に関する研究，日本建築学会構造系論文報告集 No.449, 1993.7