

論文

[1036] コンクリート中の水分移動に及ぼす環境条件および配合の影響

正会員 藤原 忠司 (岩手大学工学部)

正会員 石田 宏 (岩手大学工学部)

正会員 ○ 佐藤 嘉一郎 (オリエンタルコンクリート)

正会員 小西 俊之 (岩手大学大学院)

1. まえがき

多孔質であるコンクリートは、硬化時において内部に比較的多量の水分を保有しており、その水分は乾燥によって逸散する。また、乾燥したコンクリートは環境条件に応じて水分を獲得する。このように、コンクリート内部では常に水分の移動が生じている。

水分移動は、コンクリートの容積変化をもたらす。たとえば乾燥時の場合、容積変化によって収縮応力が発生し、収縮ひび割れを生じさせる恐れがある。また、吸水は貯水槽等の漏水の問題と関係する。さらに、水分移動は細孔中に含まれる物質の移動をもたらすから、塩害やアルカリ骨材反応による被害とも関連する可能性がある。したがって、コンクリート中での水分移動を的確に捉えておくことの意義は大きい。

この水分移動を定量的に明らかにしている例は、ほとんどない。それは、この現象の実験的把握が、きわめて難しいことを意味している。本研究では、水分移動をコンクリート内部での含水率分布の変化として捉え、この含水率分布を実測してみた。含水率分布は、雰囲気乾・湿条件によって大きく影響を受け、またコンクリート自体の性質によっても差があると推察される。これらの要因による含水率分布の違いを明らかにするのが、本研究の目的である。

2. 実験概要

コンクリート内部の含水率分布の測定方法は確立されていない。本研究では、水分の移動が1方向の供試体を対象とし、3つの方法について比較検討してみた。いずれも、質量の変化を測定する直接的な方法であるが、その中で、割裂による方法の信頼性の高いことが確認された⁽¹⁾。この方法は

図-1にその例を示すように、所定の日数で供試体を境界面近傍から順次割裂してい

き、各要素の割裂直後と絶乾後の質量とを測定して、含水率の分布を求めるものである。割裂後の試料はそのままの大きさで、一定質量となる10日程度まで105℃の乾燥炉で乾燥させ、そのときの質量を絶乾後の質量とした。

供試体の配合を表-1に、環境条件等を表-2に示す。

環境の湿度の影響をみる条件では、設備の制約からコンクリート供試体(10x10x40cmあるいは10x10x30cmの角柱)を使用できなかったため、モルタル供試体(4x4x16cmの角柱)でこれを補完した。

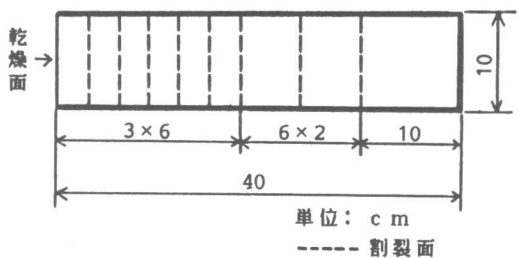


図-1 供試体の例(乾燥用コンクリート)

骨材には岩手県雫石川産の砂利（最大寸法：20mm、比重：2.54、吸水率：3.9%）と砂（比重：2.53、吸水率：3.3%）を、セメントにはコンクリートの場合に普通、モルタルの場合に早強ポルトランドセメントを用いた。供試体打設後、水中養生（普通セメント使用で28日、早強セメント使用で7日）を行ない、乾燥過程を調べる場合は養生後ただちに、吸水・吸湿過程を調べる場合は供試体をいったん絶乾状態にしてから、試験を開始した。供試体は、乾燥または吸水・吸湿面を残し、他の面をラップ、粘着テープおよびパラフィンで被覆して、これらの面から

表－1 配 合

No	種 別	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単 位 量 (kg/m³)			
				水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G
1	コンクリート	50	43	180	360	757	1003
2	コンクリート	60		180	300	778	1031
3	コンクリート	70		180	257	792	1051
4	コンクリート	50	43	150	300	810	1074
5	コンクリート	70		210	300	745	987
6	コンクリート	52	43	169	326	792	1052
7	モルタル	53	100	288	544	1323	—

表－2 環境条件等

	条 件	配合	供試体寸法 (cm)	境界面 (cm)	環 境 条 件		検討事項
					湿 度	温 度	
A	一 面 乾 燥	1～5	10×10×40	10×10	R.H.60%	20℃	配合の影響
B		6	10×10×30		R.H.60%	10,20,30℃	温度の影響
C	圧力下での吸水	2			—	—	圧力の影響
D	一 面 乾 燥	7	4×4×16	4×4	R.H.0,30,60%	20℃	湿度の影響
E	一 面 吸 湿				R.H.100%	20℃	吸 湿
F	一面吸水・他面吸湿				他面 R.H.60%	20℃	吸 水

の水分の逸散および浸透を許さないようにした。養生後に全面にシールを施した供試体では、経時的に質量の変化がほとんど生じなかったことから、シールの効果はほぼ満足すべきものであると考えられる。なお、乾燥試験の場合は、乾燥の及ばない供試体内部で、さらに水和が進行し、それが含水率分布に影響を及ぼす恐れがあるが、十分な水和が行われると思われる水中養生期間としていることから、この影響は少ないと考え、看過することとした。圧力下における吸水の条件には、透水試験機を用いた。

3. 乾燥に伴う水分移動

図－2は、乾燥過程（温・湿度一定）における含水率分布の例を示しており、乾燥が進むにつれ、含水率の低下は乾燥面側で大きく、一次元の水分移動が明瞭に認められる。

乾燥 16 週における各配合コンクリートの含水率分布を比較したのが図－3であり、単位水量が同一であれば、含水率分布にそれほど差が見受けられないが、水セメント比の大きいほど、乾燥面近傍の勾配がきつい傾向にある。単位水量の影響は大きく、これが大きいほど、全体に大きな含水率を示し、さらに乾燥面近傍にきつい含水率勾配を有する。含水率勾配は収縮応力の大き

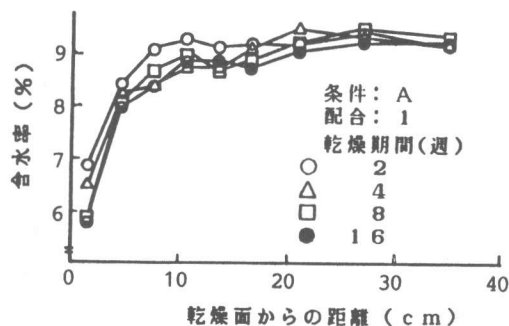


図-2 乾燥過程の含水率分布の例

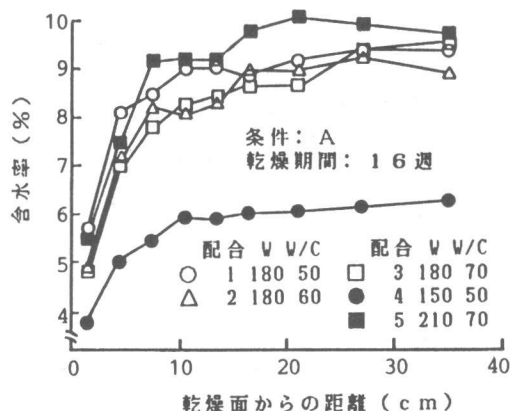


図-3 乾燥過程の含水率分布
(配合の影響)

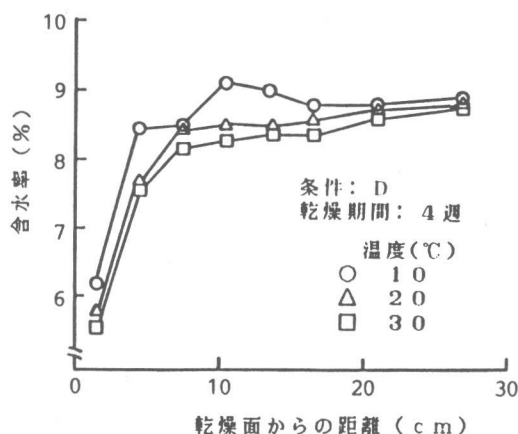


図-4 乾燥過程の含水率分布
(温度の影響)

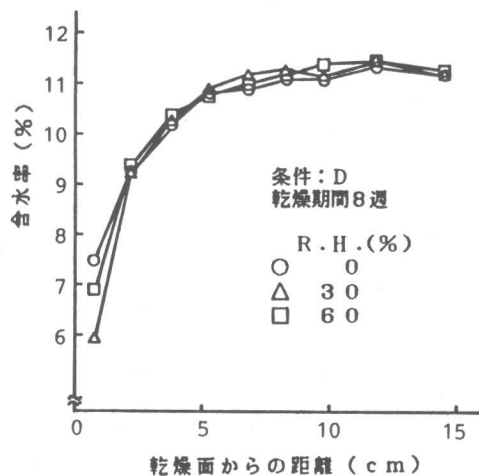


図-5 乾燥過程の含水率分布
(湿度の影響)

きさに関連し、勾配のきついほど収縮応力が大きくなるため、ひびわれ発生の危険性が高いと考えられる。したがって、一般に言われているように、単位水量をできるだけ小さくすることの意義は大きい。

乾燥過程における環境の温度および湿度の影響を示したのが、図-4および図-5である。

温度が異なる場合、含水率の分布は比較的相似する形を示すが、総体的に温度の高い条件で含水率の低下が著しい。これに対し、湿度の影響は乾燥面近傍に見られ、湿度が低いほど、乾燥面近傍の乾燥が速やかである。つまり、温度は含水率の絶対値すなわち逸散水量に、湿度は乾燥面近傍の含水率勾配に関連する傾向が見受けられる。この結果からすれば、湿度の低い場合に、乾燥面近傍に発生する収縮応力が大きいことになり、注意を要する。

4. 吸水・吸湿に伴う水分移動

図-6は、絶乾状態とした供試体の一面を水に浸し、他面を R.H.60% の空中で吸湿させた場

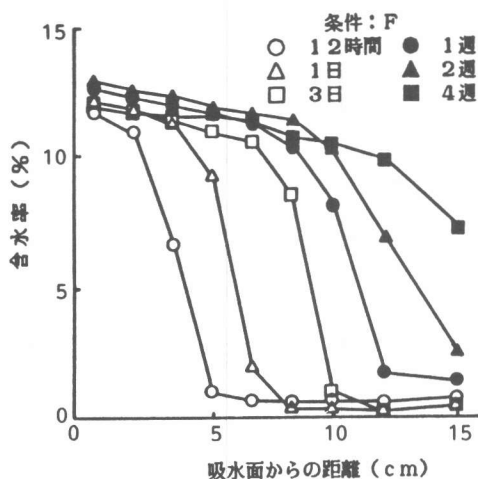


図-6 吸水過程の含水率分布

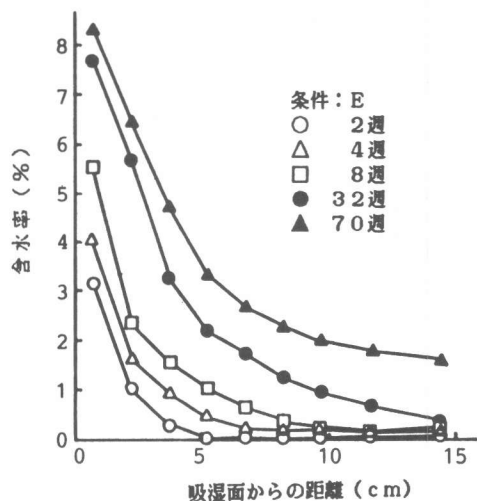


図-7 R.H.100%での吸湿による含水率分布

合、および図-7は R.H.100% の空中で一面吸湿させた場合の含水率分布を示している。

吸水過程の水分浸透がきわめて速やかであるのに対し、吸湿過程では、内部まで含水率が高まるのに長時日を要する。水分の液相と気相とでは、浸入速度に大きな違いがあると言えよう。両者の含水率曲線の形状も著しく異なり、吸水過程では、水の浸透領域がほぼ識別できる形で推移する。

水圧を比較要因とした吸水過程の含水率分布を示したのが、図-8であり、いずれの水圧でも同様の形の含水率曲線となっているが、水の浸入速度には水圧によって大きな違いがみられる。

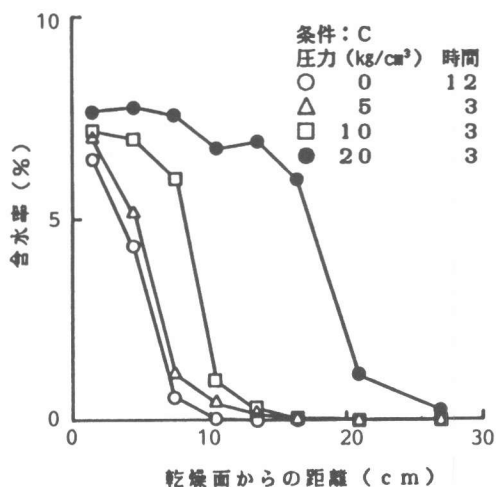


図-8 吸水過程での含水率分布(水圧の影響)

5. 拡散係数による検討

乾燥に伴うコンクリート内部での水分移動を拡散現象と考え、拡散係数を求めてみる。本実験で設定した1方向の水分移動の場合、含水率 w を拡散量とすれば、非線形の拡散方程式は次のようになる。

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (1)$$

ここに、 t : 乾燥期間(日)、 x : 境界面からの距離(cm)、 D : 拡散係数(cm^2/day)

上式をボルツマン変換すれば、次式が得られる。

$$D = \frac{1}{2} \left(\frac{d\eta}{dw} \right) \int \eta dw \quad (2)$$

ここに、 $\eta = x / t^{1/2}$

上式より拡散係数を求めるには、含水率 w と η との関係を知る必要がある。図-9は、乾燥過程の測定値について、この関係を求めた例であり、測定値はほぼ一つの曲線に沿っている。乾燥過程については、いずれの場合もこのような傾向がみられた。この曲線を次の双曲線で近似する。

$$w = (\eta + c) / \{a(\eta + c) + b\} \quad (3)$$

ここに、 a, b, c : 定数

各曲線の定数を求め、式(2)によって、拡散係数を算出する。拡散係数を求めるこの一連の手法は、既に阪田・蔵本⁽²⁾によって示されているが、図-9のような関係の近似式が異なり、本実験結果の場合は、上式のように、双曲線の近似が優れていた。

この拡散係数は含水率の関数であるが、比較をより明確にするため、飽水度(飽水時の含水率に対するその時の含水率の割合)の関数として、拡散係数を表示してみる。

図-10は、乾燥過程における単位水量一定の各配合コンクリートの拡散係数を比較している。水セメント比が大きいほど拡散係数が大きく、図-3にみられた含水率勾配の違いとよく対応する。

また、図-11は乾燥過程の温度の影響を示しており、温度が高いほど、拡散係数が大きい。したがって、図-4の結果もこの拡散係数の差で解釈できよう。

吸湿・吸水過程についても、上述の乾燥過程と同様の解析を試みた。吸湿過程の場合、含水率 w と η との関係は、 η が小さいほど含水率が大きく、図-9の乾燥過程とはほぼ対称の形を有し、しかも測定値がひとつの曲線にほとんど収斂する。しかし、これを式(3)と対称な双曲線で近似するには無理があり、他の近似式を検討する必要がある。

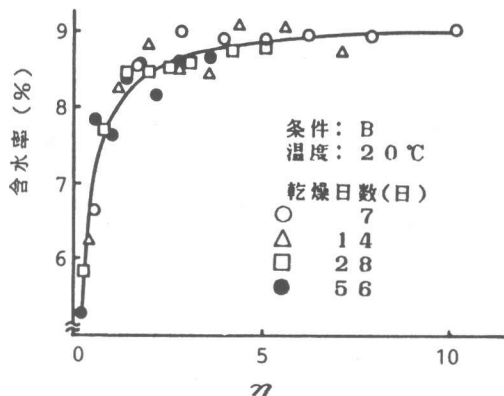


図-9 含水率と η の関係(例)

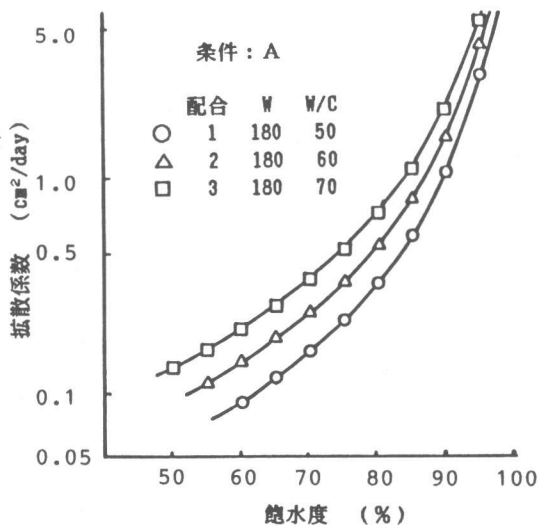


図-10 拡散係数(配合の影響)

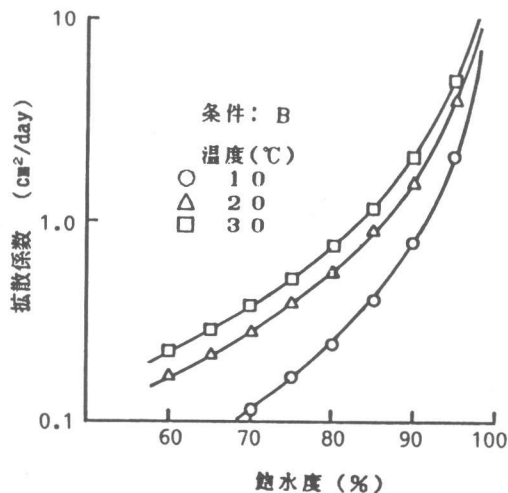


図-11 拡散係数(温度の影響)

吸水過程の場合の含水率 w と η の関係は、図-9と違い、吸水日数によってそれぞれの曲線を示し、ひとつの曲線には収束しない。それらの曲線は吸湿過程と同様に、 η が小さいほど、含水率が大きい傾向を示すが、不連続な形となっており、これらの理由によって、ここでの拡散係数を求める手法の適用はなおさら難しい。

6. あとがき

本研究では、種々の環境条件下および配合条件下におけるコンクリート内部での水分移動を、含水率分布の変化として捉えることにより、実験的に明らかにした。得られた結論は次のように要約される。

- (1) 乾燥過程における含水率分布には、配合の影響が見受けられ、とくに単位水量の影響が大きい。単位水量の大きいほど、乾燥面近傍できつい含水率勾配を有し、これがひびわれ発生をもたらす収縮応力を大きくすると考えられるから、とくに単位水量の選定に注意を要する。
- (2) 環境条件としての温度は、乾燥過程における含水率の絶対値に関わり、温度が高いほど、乾燥が速い。湿度については、乾燥面近傍の含水率勾配に関連する傾向が認められ、湿度が低いほど、その勾配はきつい。
- (3) 吸水と吸湿とでは、水分の浸透速度に大きな差があり、液相での水分移動が主になると思われる吸水で、速やかに水分の浸透が行なわれる。これに外的条件としての圧力が加われれば、その傾向が一層強まる。なお、吸湿・吸水さらには圧力下における吸水による水分移動を捉えたのは、本実験が初めての例であると思われる。
- (4) 水分移動を拡散現象として捉え、それを拡散方程式で表示するために必要な拡散係数を求める手法について検討したところ、乾燥過程に関しては、ボルツマン変換を利用する方法の有用性が認められた。吸湿・吸水過程については、検討の余地がある。

おわりに、本研究遂行に際し、御指導を賜った東北大学尾坂芳夫先生ならびに東北工業大学秋田宏先生に深甚の謝意を表します。

《文献》

- 1) 藤原・佐藤・小西：乾湿に伴うコンクリート内部での水分移動について、セメント技術年報 42, 1988, pp.427~430
- 2) 阪田・蔵本：乾燥に伴うコンクリートの水分の逸散と乾燥収縮に関する研究、土木学会論文報告集 No.316, 1981, pp.145~152