

論文 コンクリート内部の水分移動に起因した乾燥収縮および強度発現に関する基礎的研究

小林 健^{*1}・山田 和夫^{*2}・山本 俊彦^{*3}

要旨：本研究では、コンクリート内部の水分移動現象と乾燥収縮および強度発現状況との関係について実験的に検討を行った。その結果、コンクリート内部の含水量は、一般的に試験体表面に近づくにつれて減少するが、試験体の乾燥速度は鋼繊維補強コンクリートよりもプレーンコンクリートの方が若干大きいこと、コンクリート内部の乾燥収縮および強度と含水量の変化状況とは密接に関係していること、などが明らかとなった。

キーワード：コンクリート、乾燥収縮、水分移動、強度発現、経時変化、電極法

1. はじめに

筆者らは、前報[1]においてコンクリートの乾燥収縮に起因するひび割れの発生・進展挙動を解明するための基礎的研究として、まず二軸拘束下にある実物大のプレーンおよび鋼繊維補強コンクリート開口壁モデル試験体を用いて、コンクリートの乾燥収縮ひび割れの発生・進展挙動に及ぼす鋼繊維の影響について実験的および解析的に検討を加えた。その結果、鋼繊維の混入は、ひび割れ発生後のコンクリートのじん性改善およびひび割れ幅の抑制に極めて有効であり、その効果はプレーンコンクリートの場合の2倍以上であること、コンクリートの乾燥収縮ひび割れの発生・進展に伴う応力の解放程度は、乾燥収縮ひび割れ開口変位量に依存するとともに、コンクリートの種類によってもかなり相違すること、などいくつかの有用な知見を得たが、コンクリートの乾燥収縮機構およびそれに起因したひび割れの発生・進展機構を解明するためには、コンクリート内部の水分移動のレベルからコンクリートの強度の発現性状を踏まえて検討することも必要であることが明らかとなった。

そのため、本研究では、4面乾燥状態にあるコンクリートの水分移動現象を試験体内部の各所に設置した電極の抵抗を測定[2,3]することによって追跡するとともに、コンクリートの乾燥収縮および強度発現状況と含水状態との関係について実験的に検討を加えた。

2. 実験方法

2.1 実験の概要

本研究では、図-1示すような4面乾燥状態にある500X500X500mm立方試験体を用いてプレーンおよび鋼繊維補強コンクリート内部の水分移動、乾燥収縮および強度発現状況の追跡を行った。

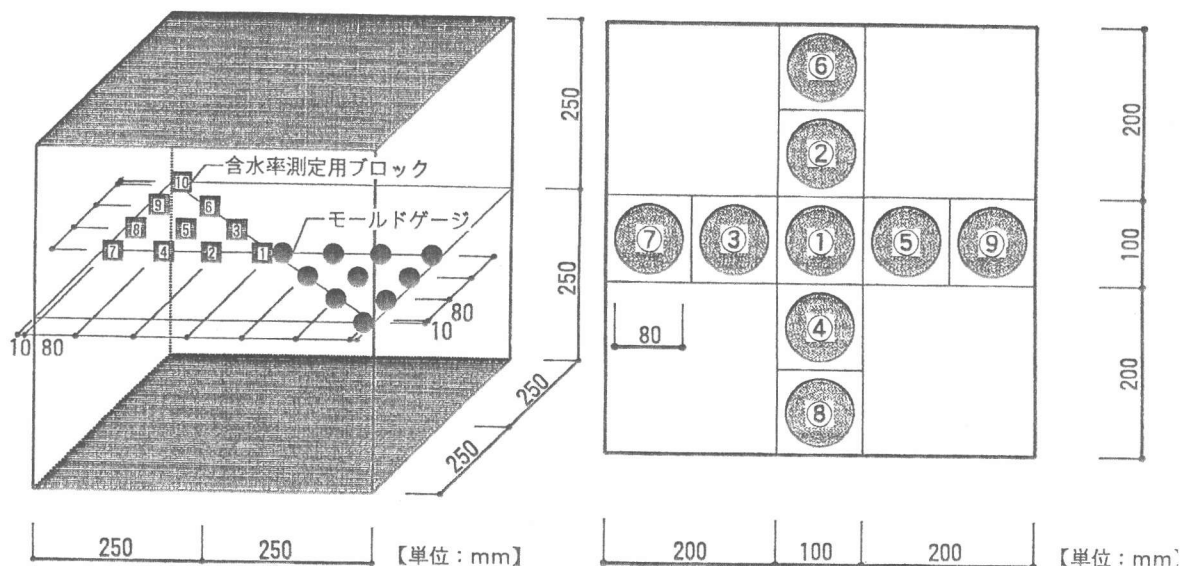
2.2 試験体の製作および養生方法

本実験では、使用材料として普通ポルトランドセメント、猿投産の山砂（最大寸法=5mm、表乾比重=2.57）、甘原産の碎石（最大寸法=15mm、表乾比重=2.67）、AE減水剤および両端フ

*1 愛知工業大学大学院 工学研究科建設システム工学専攻（正会員）

*2 愛知工業大学助教授 工学部建築学科、工博（正会員）

*3 東急建設(株)技術研究所建築研究部建築構造研究室室長、工博（正会員）



(a) 4面乾燥状態試験体

(b) コア試験体採取位置

図－1 試験体の形状・寸法および測定位置

表－1 コンクリートの調合表

(a) プレーンコンクリート

W/C (%)	標準調合(kg/m ³)					設計ス ランプ(cm)	設計空 気量(%)
	水	セメント	砂	砂利	混和剤		
60	185	308	957	816	0.62	18.0	4.0

(b) 鋼繊維補強コンクリート

W/C (%)	標準調合(kg/m ³)						設計ス ランプ(cm)	設計空 気量(%)
	水	セメント	砂	砂利	混和剤	鋼繊維		
60	183	305	947	808	0.61	78.5	18.0	4.0

ック付きスチールファイバー（断面：0.5mm角、長さ：30mm）を使用した。コンクリートの調合は、水セメント比（W/C）を60%、鋼繊維体積混入率（V_f）を0および1.0%の2種類、設計スランプを18cmとなるように設定して試し練りによって決定した。本実験で用いたコンクリートの調合表を表－1に示す。試験体は、打設後1日目に脱型した後に試験体上下面を弾性エポキシ樹脂と塩ビ板によってコーティングし、試験体上下方向に水分が蒸発しないようにして以後実験室内で空中養生を行った。試験体個数は、プレーンおよび鋼繊維補強コンクリートに対して各4個とした。また、圧縮および割裂引張強度の管理用として、φ100x200mm円柱試験体を各3個一組として必要個数、電気抵抗値とコンクリート内部の水分量との関係を求めるために、コンクリート内部の水分量[3]を100、90、80、60、40および20%の6種類に設定した電極埋設のφ75×150mm円柱試験体も同時に製作した。なお、φ75×150mm円柱試験体は、脱型後約1ヶ月間標準水中養生を行った後に内部水分量が所定量になるまで乾燥し、その後直ちに内径80mmの塩ビ製円筒容器で密封して水分が変動しないようにし、以後温度20±3℃の養生室内で空中養生を行った。

2.3 測定項目および測定方法

(1) 水分移動および乾燥収縮ひずみの測定：コンクリート内部の水分量の測定には電気抵抗値に及ぼす粗骨材および鋼繊維の影響を除去するために、あらかじめ図－2に示すような内部に電気抵抗値測定用のステンレス製電極（直径：3mm、長さ：40mm、間隔：20mm）を埋め

込んだ寸法40X40X40mmのウェットスクリーニングされたモルタル製ブロックを用いて電極間に粗骨材や鋼繊維が入り込まないように工夫した。電気抵抗測定用のモルタル製ブロックは、コンクリート試験体製作の約1週間前に製作し、以後コンクリート打設時まで水中養生を行って内部水分が蒸発しないようにした。コンクリートの打設は、電気抵抗測定用ブロックを前掲の図-1に示す500X500X500mm立方試験体内部の所定位置およびφ75×150mm円柱試験体内部中央にセットした直後に行った。結果の整理に際しては、電気抵抗値に及ぼす電極の表面積（A）および間隔（L）の影響を除去

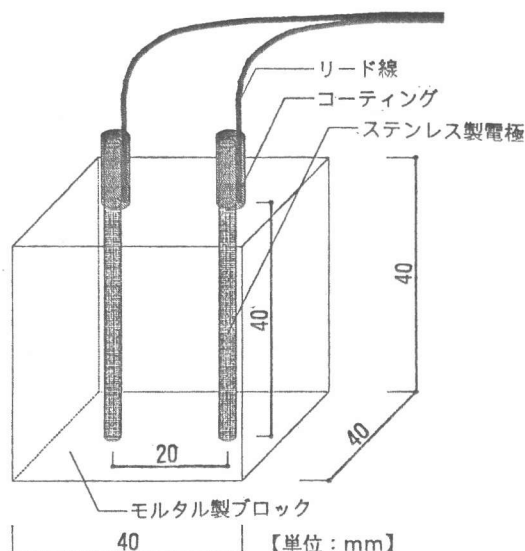


図-2 電気抵抗測定用モルタルブロック

するために、LCRメータを用いて測定された電気抵抗値（R）を比抵抗値（ $\rho = R \cdot A / L$ ）に変換した後、後述の含水量と比抵抗値との関係式を用いてコンクリート内部の水分量を算定した。また、前掲の図-1に示す所定の位置に埋め込んだ測定長が125mmと100mm（熱電対内蔵型）のモールドゲージを用いてコンクリート内部の乾燥収縮ひずみを測定するとともに、各測定位置にコンクリートの内部温度測定用の熱電対を設置して試験体部の温度管理も同時に行った。電気抵抗値を除くデータは、いずれもデータロガーおよび自記記録装置を用いて自動計測した。

（2）コンクリート強度の測定：コンクリート内部の強度発現状況を調べるために、前掲の図-1に示す位置からφ80×160mmのコアを各9個採取し、コンクリート内部の圧縮強度を測定した。なお、コア試験体の強度試験は、コア採取および試験体成形時に水の使用によって試験体が湿潤状態となったため、コア採取後約1週間養生室内で空中養生を行った後に実施した。また、強度管理用のφ100×200mm円柱試験体を用いて圧縮および割裂引張強度の測定も同時に行った。試験材齢は1および3ヶ月の2種類（材齢6および12ヶ月は継続中）とした。

3. 実験結果とその考察

3.1 コンクリート内部の水分量と電気抵抗値との関係

図-3は、コンクリート内部の水分量を変化させたφ75×150mm円柱試験体によって得られた含水量（W）と比抵抗値（ ρ ）との関係を示したものである。この図によると、含水量が80～100%の範

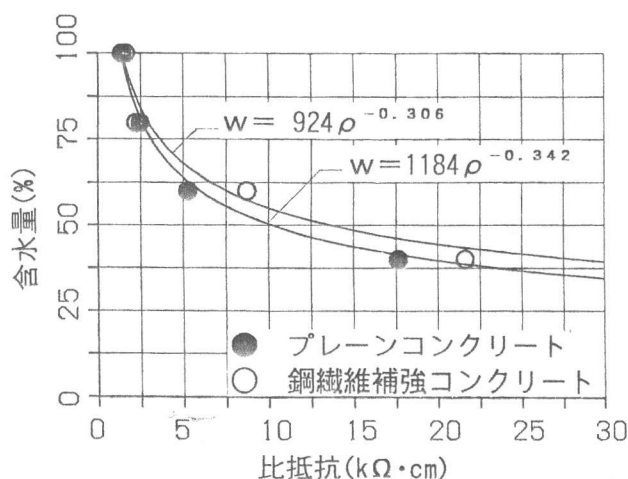


図-3 コンクリートの含水量と比抵抗値との関係

囲ではコンクリートの種類にかかわらず同程度の比抵抗値を示しているが、含水量が80%よりも小さい範囲になると同一含水量時の比抵抗値は、プレーンコンクリートよりも鋼繊維補強コンク

リート方が約20～30%大きな値となっている。なお、含水量が80%以下の範囲で比抵抗値がコンクリートの種類によって相違した原因については現在のところ不明であるため、この点については今後詳細に検討する必要がある。本実験の範囲においては、含水量（W）と比抵抗値（ ρ ）との関係に関する以下のような実験式が得られた。

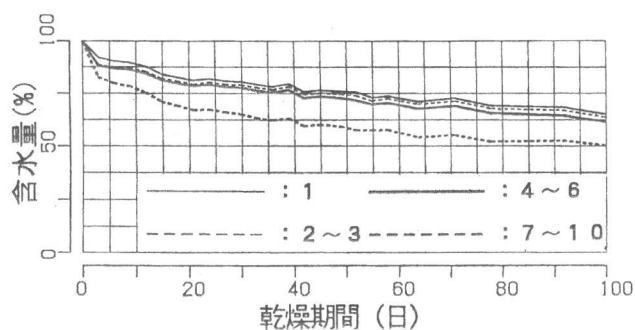
プレーンコンクリート： $w = 1184 \rho^{-0.342}$ (1)

鋼繊維補強コンクリート： $w = 924 \rho^{-0.306}$ (2)

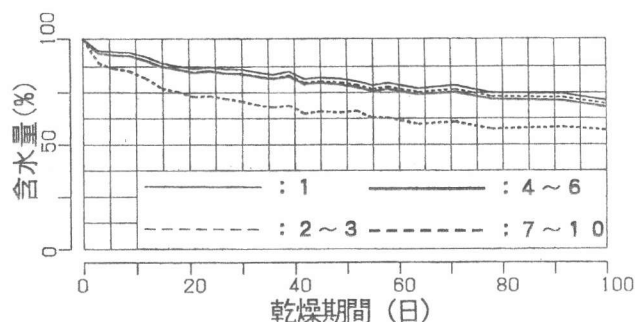
3.2 コンクリート内部の水分移動

図-4(a)および(b)は、それぞれプレーンおよび鋼繊維補強コンクリート内部の含水量の経時変化を測定部位別に示したものである。これらの図によれば、コンクリート内部の含水量は、測定部位およびコンクリートの種類にかかわらず材齢の経過とともに、かつ試験体表面に近づくにつれて徐々に小さくなっていく傾向を示している。ただし、試験体表面のごく近傍の範囲になると含水量は著しく低下しており、試験体表面の乾燥による水分の蒸発の影響が表面近傍に集中している様子も読み取れる。また、試験体の乾燥速度は、鋼繊維補強コンクリートよりもプレーンコンクリートの方が若干大きくなっていることがわかる。例えば、材齢100日における試験体表面の含水量は、鋼繊維補強コンクリートの場合が約56%であるのに対して、プレーンコンクリートの場合は51%となっている。これは、コンクリート内部での水分移動が鋼繊維の存在によってある程度阻止されるためと思われる。なお、材齢100日における水分量の試験体中央部と表面近傍との差は、いずれのコンクリートも約16%であり、コンクリートの種類による相違は認められない。

3.3 コンクリート内部の乾燥収縮

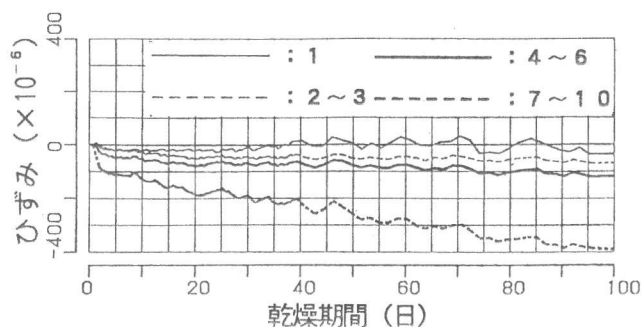


(a) プレーンコンクリート

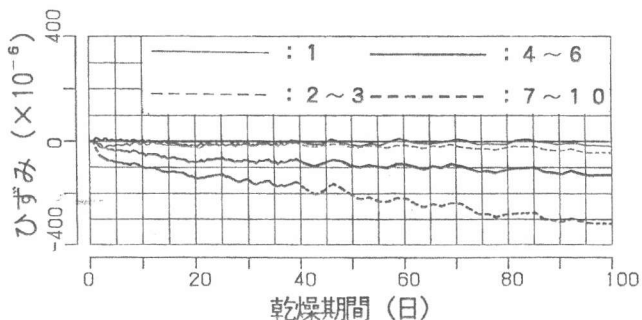


(b) 鋼繊維補強コンクリート

図-4 コンクリート内部の含水量の経時変化



(a) プレーンコンクリート



(b) 鋼繊維補強コンクリート

図-5 コンクリート内部の乾燥収縮の経時変化

図-5(a)および(b)は、それぞれプレーンおよび鋼繊維補強コンクリート内部の乾燥収縮ひずみの経時変化を測定部位別に示したものである。これらの図によれば、コンクリート内部における乾燥収縮の経時変化は、前掲の図-4に示した含水量の経時変化と密接に関係していることがわかる。すなわち、コンクリート内部の乾燥収縮ひずみは、その位置の含水量に応じて変化し、一般的に試験体表面に近いほど、また鋼繊維補強コンクリートよりもプレーンコンクリートの方が大きくなっている。例えば、材齢100日における試験体表面の乾燥収縮ひずみ量は、プレーンコンクリートの場合が約 -390μ であるのに対して鋼繊維補強コンクリートの場合は約 -320μ となっており、含水量の相違とよく対応している。

ただし、試験体中央から約160mmまでの範囲における乾燥収縮ひずみ量は、コンクリートの種類によってそれほど明確な相違は認められない。

3.4 コンクリート内部の強度特性

表-2および表-3は、強度管理用試験体およびコア試験体によって得られた強度試験結果を一覧表にして示したものである。前述のコンクリ

表-2 強度管理用試験体による強度試験結果
(a)プレーンコンクリート

材齢	圧縮強度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	比重
1ヶ月	256	21.1	2.19
3ヶ月	286	25.1	2.20

(b)鋼繊維補強コンクリート

材齢	圧縮強度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	比重
1ヶ月	209	30.5	2.18
3ヶ月	236	34.5	2.25

表-3 コア試験体による強度試験結果

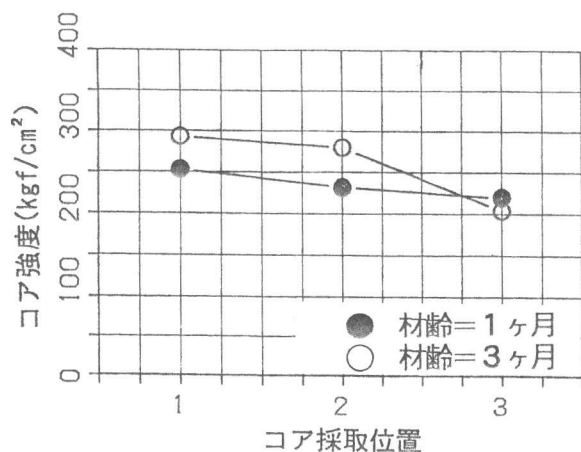
(a)プレーンコンクリート

材齢	項目	位置-1	位置-2	位置-3
1ヶ月	強度 (kgf/cm ²)	253	232	220
	比重	2.17	2.18	2.15
3ヶ月	強度 (kgf/cm ²)	293	280	204
	比重	2.21	2.21	2.20

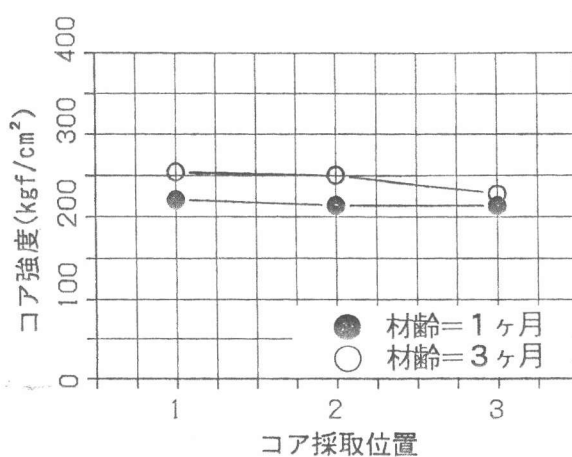
(b)鋼繊維補強コンクリート

材齢	項目	位置-1	位置-2	位置-3
1ヶ月	強度 (kgf/cm ²)	221	214	214
	比重	2.12	2.14	2.13
3ヶ月	強度 (kgf/cm ²)	254	250	228
	比重	2.21	2.22	2.20

[注] 位置-1: 試験体中央部、位置-2: 試験体中央から10cm部、位置-3: 試験体周辺部。



(a)プレーンコンクリート



(b)鋼繊維補強コンクリート

[注] 位置-1: 試験体中央部、位置-2: 試験体中央から10cm部、位置-3: 試験体周辺部。

図-6 コンクリート内部の強度分布

ート内部の含水量と測定位置との関係から判断すると、コア試験体の比重はコア採取位置と特定の関係にあることが予想されるが、表-3によれば、コア試験体の比重に及ぼすコア採取位置の影響は、それほど明確には認められない。これは、コア採取後約1週間空中に放置した後に比重の計測を行ったためではないかと思われる。ただし、強度試験結果は、図-6(a)および(b)から明らかなように、試験材齢、コア採取位置およびコンクリートの種類によって影響を受けている。すなわち、コア強度は、コンクリートの種類にかかわらず一般的に材齢の経過とともに増大し、かつコア採取位置が試験体表面に近いほど小さくなる傾向を示している。また、これらのコア強度に及ぼす試験材齢およびコア採取位置の影響は、コンクリート内部の含水量の変化のより著しいプレーンコンクリートの方が鋼繊維補強コンクリートよりも顕著となっている。特に、プレーンコンクリートの試験体表面近傍の材齢3ヶ月におけるコア強度は、材齢1ヶ月の場合よりも小さくなっており、プレーンコンクリートの試験体表面近くでは、セメントの水和反応に必要な水が含水量の局所的な低下によって不足し、結果的に強度発現が阻止されたことを示している。

4. 結 論

本研究では、コンクリートの乾燥収縮機構およびそれに起因したひび割れの発生・進展機構を解明するため基礎的研究として、コンクリート内部の水分移動現象と乾燥収縮および強度発現状況との関係について実験的に検討を行った。本研究によって得られた結果を要約すると、およそ次のようにまとめられる。

- 1) コンクリート内部の含水量は、試験体表面に近づくにつれて減少するが、特に試験体表面の極近傍における含水量の低下が著しい。また、試験体の乾燥速度は、鋼繊維補強コンクリートよりもプレーンコンクリートの方が若干大きい。
- 2) コンクリート内部の乾燥収縮の経時変化は、含水量の経時変化と密接に関係しており、乾燥収縮ひずみは、一般的に含水量の減少に伴って増大する。また、試験体表面近傍の乾燥収縮ひずみ量は、鋼繊維補強コンクリートよりもプレーンコンクリートの方が若干大きい。
- 3) コンクリート内部から採取したコア試験体の強度は、一般的に材齢の経過とともに増大するが、同一材齢の場合には、試験体表面に近い箇所から採取したものほど小さくなる。これら内部強度の変化状況は、鋼繊維補強コンクリートよりもプレーンコンクリートの方が著しい。

謝 辞

実験およびデータ整理に際してご助力を得た愛知工業大学学部学生の森 光紀君、猪飼雅彦君および熊切早苗嬢に対して謝意を表します。

引用文献

- 1) 渡部 憲・山田和夫・山本俊彦・小林 健：鋼繊維によるコンクリートの乾燥収縮ひび割れ抑止効果に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文報告集、第16巻、第1号、pp.597-602、1994.6
- 2) 桂 修・吉野利幸・田畑雅幸・鎌田英治：交流2電極法によるコンクリート中の含水率測定についての理論的検証、コンクリート工学年次論文報告集、第16巻、第1号、pp.735-740、1994.6
- 3) 小野博宣・加藤 聡・大岸佐吉：コンクリートの含水率測定における電気抵抗法の適用性、セメント・コンクリート論文集、No.48、pp.238-243、1994.12