

竣工後13年を経過した構造体コンクリートの含水率の変化

長尾 覚 博 中 根 淳

Moisture Content of Concrete Structures 13 years from construction

Kakuhiro Nagao Sunao Nakane

Abstract

Research was carried out concerning variations in moisture content influencing mechanical properties and drying shrinkage of concrete in structures. The electrode method was used for measurement of moisture content, with the distributions and average moisture contents in concrete members such as columns, beams, walls, and slabs checked. As a result, it was shown that variation of moisture content is affected by dimensions of the member, environmental conditions, and the finishing. And it was confirmed that moisture content distributions in members become approximately constant for long periods. Furthermore, the problem in analyzing moisture content was shown using the diffusion equation. Still further, the results of strain measurements were given and it was shown that variation in moisture content has a trend similar to that of drying strain.

概 要

構造体コンクリートの力学特性および乾燥収縮性状に影響を与えるコンクリート部材内部の含水率の変化を、実構造体について竣工後13年間にわたり調査した。

含水率の測定には電極法を用い、実構造体の柱、はり、壁、スラブの各部材内部の含水率分布および平均含水率を測定した。その結果、含水率の変化は部材寸法、環境条件、仕上げ方法により影響を受けることを示し、長期的には部材内部の含水率分布はほぼ一様となることを明らかにした。また、拡散方程式により部材内部の含水率の変化を予測し、解析上の課題を示した。さらに、ひずみの測定結果についても示し、含水率の変化と収縮ひずみが類似の傾向が認められることを示した。

1. はじめに

構造体コンクリートの力学特性の変化および乾燥収縮に影響を与える各種要因のうち、含水率の影響が大きいことは既往の研究からも明らかである¹⁾²⁾。しかし、実構造体の含水率の実態を長期的に調査した例はほとんどなく、乾燥を伴う実部材の強度特性を的確に評価し得ないことのほか、ひびわれの主要な原因である実部材における乾燥収縮ひずみの把握が困難なのが現状と考えられる。そこで本報では、コンクリート打込み後約13年にわたり実際に施工された構造体コンクリート各部材の含水率およびひずみの経時変化を測定し、その長期的な挙動の実態を示した。さらに、拡散方程式により部材内部の含水率の変化を予測し、解析上の課題を示した。

2. 測定概要

2.1 測定対象建物および部材の種類

測定対象とした建物は、地下1階、地上3階の鉄筋コンクリート構造で、構造部材の形状寸法、仕上げ方法および使用状態など、一般的な事務所建築である。図-1にその平面図および測定箇所を示す。測定した部材は、はり(地中、2F内、2F外、屋上)、柱(外柱、内柱)、壁(外壁、内壁)、スラブの4種類合計9部材である。

2.2 測定項目および方法

測定項目および測定方法は以下の通りである。

① 含水率：部材断面内の含水率分布の経時変化が測定可能な電極法³⁾を用いた。なお、電極の長期安定性は別途確認している。

② ひずみ：埋込型ひずみゲージを用いた。

また、含水率およびひずみを算出する際に必要な部材内部の温度は、タイプT熱電対により測定した。各部材内部の測定位置は図-2に併記したとおりである。

2.3 使用材料およびコンクリートの調査

使用材料およびコンクリートの調査は、表-1および表-2に示す通りである。

なお、コンクリートの打込みは7～9月の夏期に実施した。

3. 測定結果および考察

3.1 含水率の測定結果

構造体コンクリートの含水率の変化は、施工時期、環境条件、調査、部材寸法、養生方法および仕上げ方法な

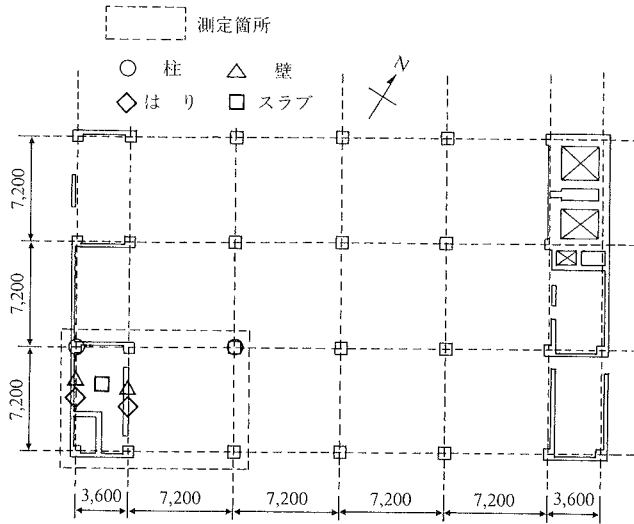


図-1 平面図および測定箇所

表-1 使用材料

セメント	細骨材			粗骨材			混和剤
	産地	粗粒率	表乾比重	産地	実績率	表乾比重	
普通	木更津			秩父			AE減水剤 流動化剤
ポルト	秩父	2.65	2.62	青梅	59.3	2.67	
ランド	混合			混合	%		

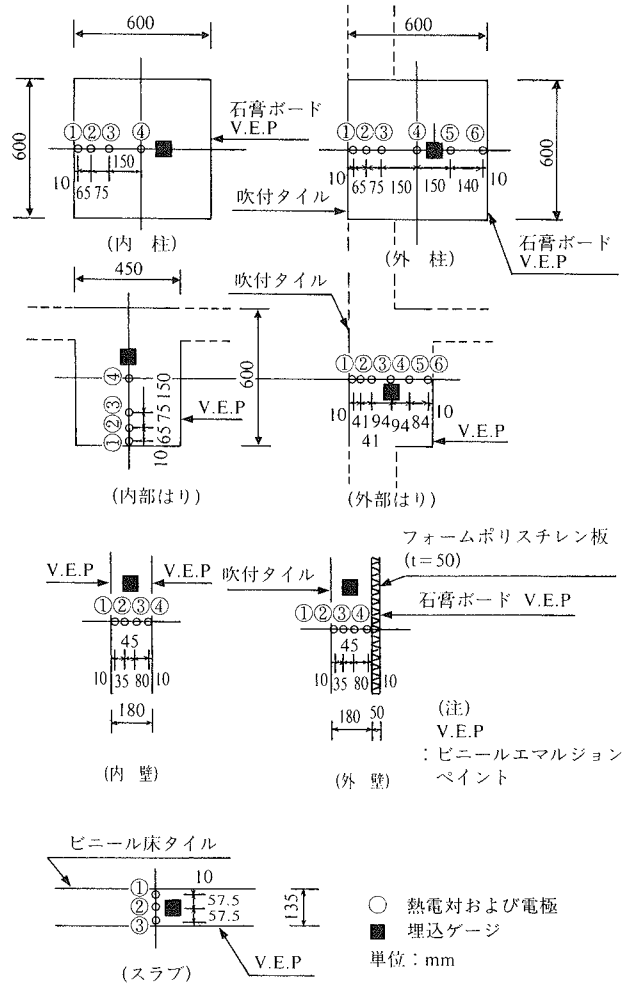


図-2 部材寸法、仕上げの種類および測定位置

表-2 コンクリートの調査

対象部材	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位セメント量 (kg/m³)	単位水量 (kg/m³)	細骨材 (kg/m³)	粗骨材 (kg/m³)	混和剤 (l)	設計基準強度 (kgf/cm²)	スランプ (cm)
地中はり	62.0	46.0	310	192	807	967	1.240**	210	18
内柱, 内壁 2F内はり	58.0	45.5	307	178	815	999	1.128** 1.1*	240	12→18
外柱, 外壁 2F外はり スラブ	58.0	46.5	319	185	820	964	1.276** 1.1*	240	12→18
RFはり	60.0	46.5	319	186	823	967	1.240**	240	18

*流動化剤, **AE減水剤

どの影響を受ける。ここではこれらの要因の内、部材の種類、仕上げ方法、環境条件の影響について検討した。

なお、含水率はコンクリート単位体積中の自由水の体積の割合（%/vol）で表した。

3.1.1 部材断面内の含水率分布 部材内部の含水率分布の経時変化を部材寸法および環境条件の異なる柱、壁、スラブについて図-3に示す。

これより一般的傾向として部材内部の含水率は、部材により異なるものの材齢の経過に伴い低下する。低下の速度は、各部材とも表層部分が大きく、内部ほど小さい。また、部材断面の大きい柱は、壁やスラブのように断面の薄いものに比べ部材内部の含水率の低下は遅い。

各部材とも、内部の含水率が高く表層部が最も低くなり、部材断面が大きいほど、また乾燥開始後、比較的初期の段階において内部と表層部の含水率の差が大きい。材齢100日で表層部と内部の含水率の差を見ると、外柱では約12%/vol、内柱で約8%/vol、外壁で約7%/vol、内壁で約4%/vol、スラブで約3%/volとなっている。このような内部と表層部の含水率の差は材齢の経過と共に小となり、材齢4,500日では各部材とも約1%/vol程度の差となり、断面内はほぼ一様の含水率分布を示している。

一方、外気に接する部材と建物内部に位置する部材とでは、乾燥が継続する建物内部の部材が外気に接する部材よりも乾燥の程度が大きい。柱についてみると、外柱に比較して内柱は同一断面寸法であっても部材内部の含水率の低下が、特に初期の材齢において大きい。壁についてもこの傾向はほぼ同様であるが、外壁では室内側に断熱材として透湿性の低いフォームポリスチレン板（t=50mm）が設置されているため乾燥が妨げられ、室内側表層部の含水率が常に高含水率を保持している。すなわち、部材の含水率の変化は部材断面の寸法、環境条件のほかには仕上げ材の有無および仕上げ材の種類によって大きな影響を受けることがわかる。しかし、今回の測定対象建物の仕上げは外部が吹き付けタイル、室内側は石膏

ボードとV.E.P（ビニルエマルジョンペイント）による仕上げであるが、含水率分布の測定結果を比較すると、乾燥を妨げるという面で前述のフォームポリスチレン板ほどの効果はなかったものと考えられる。

3.2 各部材の平均含水率

部材ごとの乾燥の程度を比較するため、各部材断面内の含水率分布を平均して求めた平均含水率の経時変化を図-4に示す。ここで平均含水率は、断面内の各測点と対象となる部分の含水率を等価とみなし、測定値の重みづけをして求めたものである。

これより、材齢28日で比較すると、内壁を除いて各部材とも高含水率状態を保持しており、部材による差は顕著ではない。しかし、材齢100日を経過した時期より部材間の含水率の差が明らかとなる傾向を示している。

はりに着目すると、地中はり（BF）と屋上はり（RF）の含水率の低下が、一般階のはり（2F内、2F外）に比べて緩慢である。これは、地中はりの場合、温度、湿度の変化が少なく乾燥条件が穏やかなことによると思われる。また、屋上はりでは初期材齢時に外部から雨水などの水分の補給および滞留が容易であったことによると推察される。すなわち、含水率の変化は部材の置かれた環境条件の影響を受け、地中はりや屋上はりは材齢1,000日を経過しても10%/vol程度の含水率を維持している。特に地中はりについては材齢4,500日を経過しても約9%/vol程度の含水率となっており長期的に乾燥が進みにくいことがわかる。内はりについては、材齢300日以降急激に含水率の低下が進んでいるが、スラブや内壁と同様、室内に位置するためまず表面の乾燥が進行し、材齢300日頃から内部にまで乾燥が及ぶことによるものと推察される。

柱は、材齢300日頃までは内柱の含水率の低下が外柱よりも大きい。以降は内柱と外柱との平均含水率の変化に顕著な差はなく、材齢100日で約11%/vol前後、材齢400日で7～8%/vol程度となった。

内壁とスラブでは、材齢100日程度までは内壁の含水率

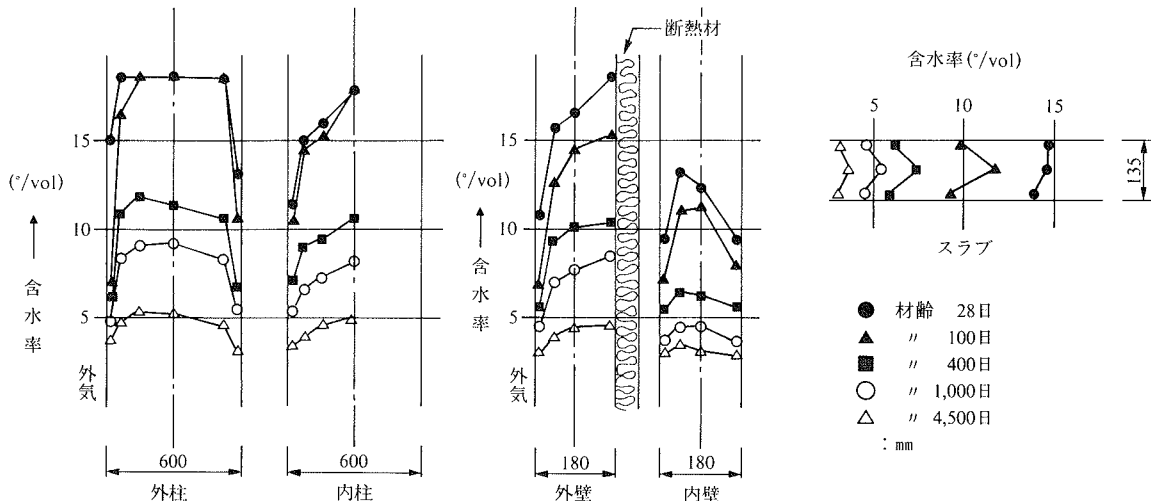


図-3 部材断面内の含水率分布

の低下がスラブより大きいが、以降はほぼ類似の傾向を示し、材齢4,500日で内壁の含水率が最小値を示した。

外壁は前述したように室内側に設置された断熱材および外気条件の影響を受け内壁より乾燥の進行が遅く、材齢1,000日においても約7%/vol、材齢4,500日においても約5%/vol程度の含水率を保持している。

これらのことから、各部材は条件により乾燥過程での差はあるものの長期的にはかなり含水率が低下すると考えることができる。

3.3 拡散方程式によるコンクリート部材中の含水率の予測

常温状態で乾燥するコンクリート中の含水状態は、BAZANT⁹⁾が相対湿度を変数とする予測を提案している。また、既往の報告⁵⁾では含水量で拡散方程式を表すには誤差が大きく、空隙内の相対湿度か脱水量を用いて拡散方程式を解くほうが良いことが指摘されている。

そこで、ここでは相対湿度を変数とする拡散方程式(3.1式)を用い、長期間乾燥が持続するコンクリート部材中の含水率の予測を試みた。

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \text{div}(C \text{grad} H) \dots\dots\dots (3.1)$$

ここで H：相対湿度 (%)

C：湿気拡散率 (m²/hr)

解析では(3.1)式を差分方程式に置き換え、まずコンクリート中の相対湿度を求め、文献⁵⁾に示されている相対湿度と含水率との関係を用い含水率を推定する方法をとった。また、仮定条件として、部材周囲の温度、湿度は一定とし、壁およびスラブについて一次元の解析を行

った。解析に使用した定数は文献^{7),8)}より表-3に示す通りとした。ここで、各定数は、相対湿度(含水率)の影響を受け非線形な挙動を示すが、今回の解析では一定値と仮定している。なお、外気の相対湿度は70%RH、室内は60%RHとし、コンクリートの初期含水率はコンクリートの単位水量を考慮し、18%/volと仮定した。また、外壁については、片面が透湿性の小さい仕上げ材が施工された場合を想定した一面乾燥の場合と両面から乾燥が進む場合の2ケースについて材齢4,500日まで解析した。解析結果は図-5に示す。

これより、含水率分布の解析値は、実測値と類似の傾向を示しているが、長期間乾燥が継続すると実測値よりも早い時期に定常に達し、竣工後約13年を経過してもなお部材内部は非線形な含水率分布を示す実測結果とは異

表-3 仮定した定数

定数	仮定値
湿気拡散率	7.0×10 ⁻⁷ m ² /hr
湿気伝導率	3.45×10 ⁻³ g/m・hr・mmHg
湿気伝達率(室外)	55 g/m ² ・hr・mmHg
湿気伝達率(室内)	20 g/m ² ・hr・mmHg

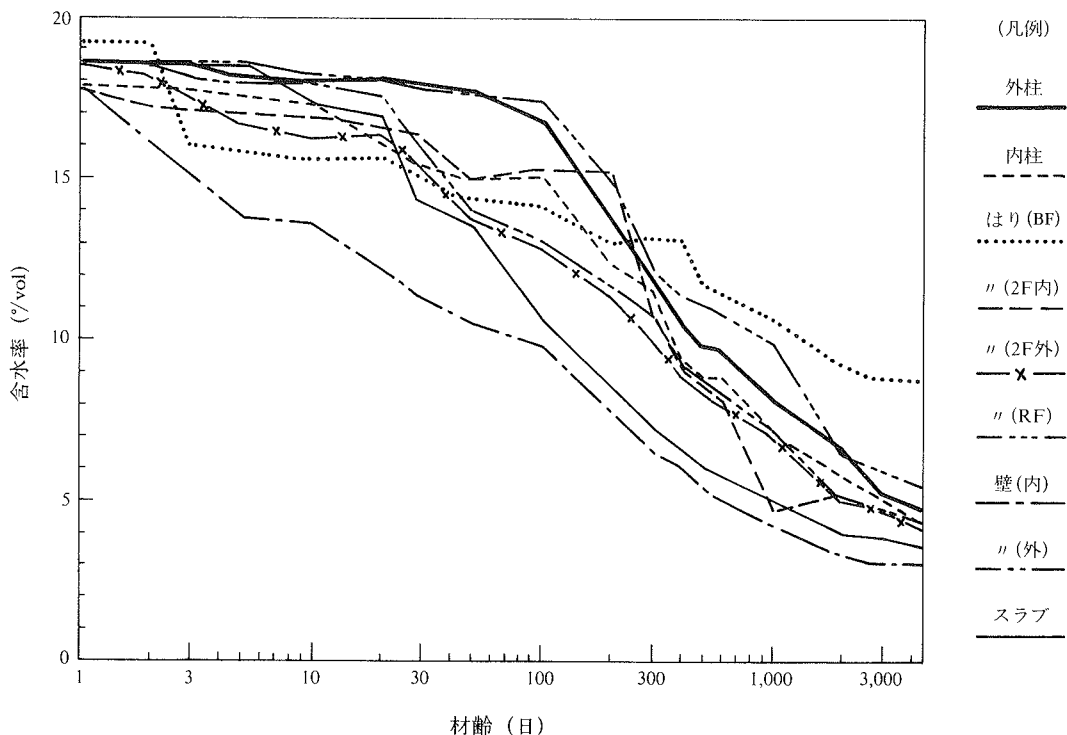


図-4 部材の平均含水率

なっている。

これは、解析では含水率に依存する湿気拡散率および湿気伝導率を部材内部で一定と仮定していること、また、実際には乾湿が繰り返される環境条件を一定としたことによると考えられる。また、材齢初期の含水率は実測値より大となっているが、これは水和の進行に伴う内部乾燥を考慮していないことが影響していると考えられる。

前述した課題があるものの、解析値は実測値と概ね符合する傾向を示し、常温下において乾燥が継続するコンクリート部材内部の含水率の変化が拡散方程式により推定可能と考えられる。

今後より実際的な予測解析を行うためには、定数の非線形性、水和による内部乾燥、温度変化、施工条件および吸湿などの影響を考慮する必要があると考える。

3.4 ひずみの測定結果

ひずみの測定結果から、コンクリートの線膨張係数を $1.0 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ と仮定し、拘束条件下にある各部材の温度変化による影響を除いたひずみの経時変化を図-6に示す。

図-6の結果は、硬化収縮、クリープ、および応力などによるひずみを包含したものとなっており、一義的に含水率の低下に伴う乾燥収縮ひずみと見なすことはでき

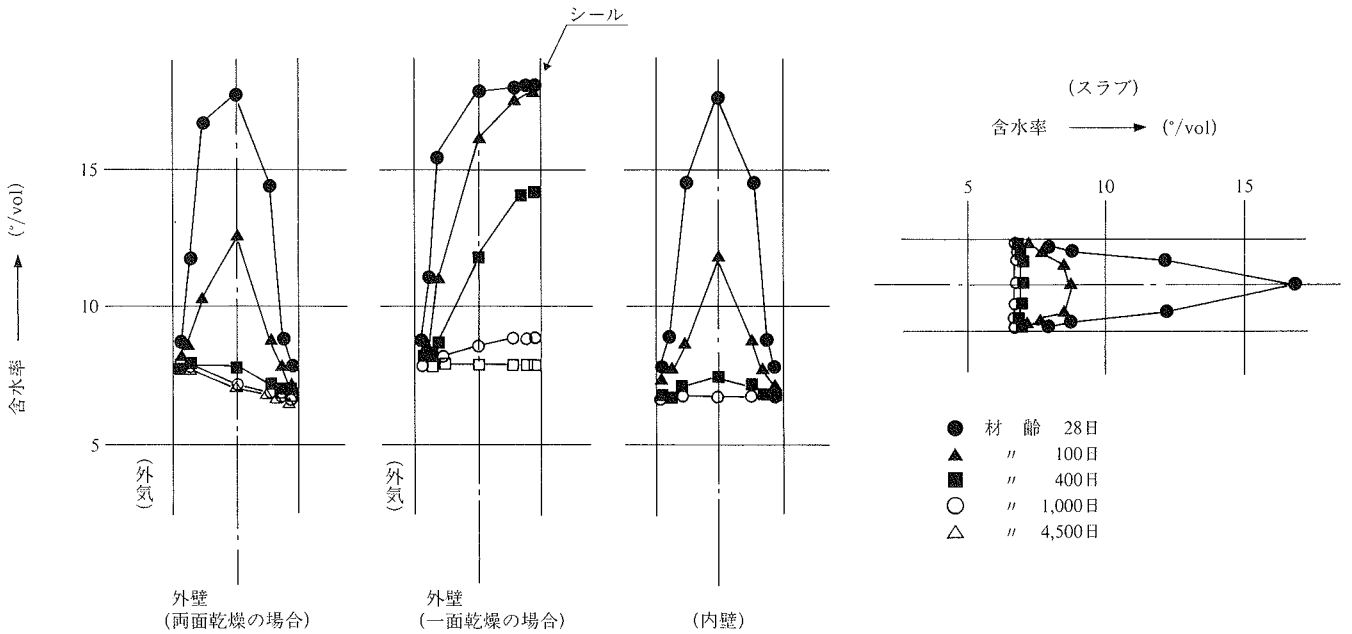


図-5 解析結果

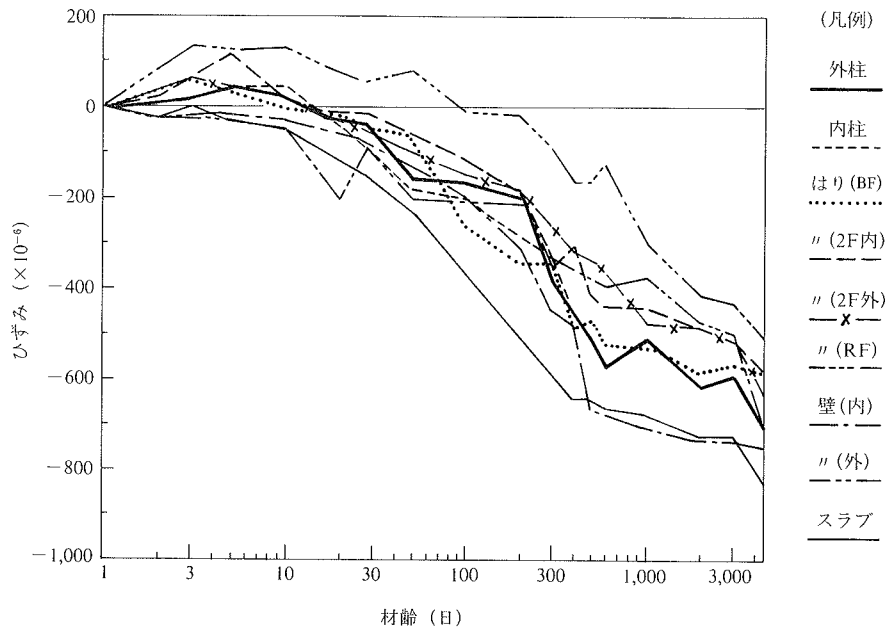


図-6 温度変化の影響を除いたひずみの測定結果

ないが、含水率の低下が顕著な部材と含水率の低下が緩慢な部材との間には差異が認められる。すなわち、含水率の低下が顕著な内壁、スラブのひずみは含水率の低下が緩慢な柱、はりに比較して大という傾向が認められ、含水率の影響が大きいことが推察される。また、材齢4,500日におけるひずみは埋込みゲージの長期安定性の問題はあがるが、約 $400\sim 800\times 10^{-6}$ の範囲となった。

4. まとめ

今回の測定結果をまとめると以下の通りとなる。

- ① 部材内部の含水率分布は部材寸法、環境条件、仕上げ材により影響を受け、断面内外の含水率の差は部材寸法が大きいほど、また初期材齢ほど大きい。
- ② 部材の平均含水率は材齢の経過と共に条件により差異があるものの長期的に低下する。また含水率の変化は部材寸法、環境条件、仕上げの種類により影響を受け、部材寸法の小さいもの、また室内に位置する部材ほど含水率の低下が大きい。
- ③ 常温下におけるコンクリート部材中の含水率の予測方法として拡散方程式が有用と考えられる。しかし、より実際的な予測を行うためには、定数の非線形性および水和による内部乾燥などの影響を考慮する必要がある。
- ④ 温度変化による影響を除いた部材のひずみは含水率の変化と類似の傾向が認められ、乾燥に伴う部材の自由ひずみを評価をする上で含水率が有効な指標になるものと思われる。

今回の測定結果により、実構造体におけるコンクリート部材の含水率について長期的な経時変化の実態および予測解析上の課題を示した。

今後、コンクリート部材の含水率と強度、弾性係数あるいは乾燥収縮ひびわれとの関係を実構造物との対応で評価するため、コンクリート部材中の含水挙動の予測方法を確立する必要がある。

参考文献

- 1) Walter, H. P. : Fractors Influencing Concrete Strength, ACI Journal, (1951. 2)
- 2) 杉山：構造物コンクリートの力学的性状に及ぼす乾燥の影響に関する研究，北海道大学学位論文，(1980)
- 3) 田畑，他：電極法によるコンクリート含水率の測定，日本建築学会大会学術講演梗概集，p. 117～118，(1976.10)
- 4) 一瀬，他：実構造体における含水率の測定，セメント技術年報 39，p. 257～260，(1985)
- 5) 永松，佐藤：非線形拡散方程式によるコンクリートの脱水量の分布に関する研究，セメント技術年報 35，p. 162～165，(1981)
- 6) Z. P. BAZANT, L. J, NAJJAR : Nonlinear water diffusion in nonsaturated concrete, MATERIALS AND STRUCTURES, Vol. 5, No. 25, p. 3～20, (1972)
- 7) 西岡，原田：コンクリートの透湿率および湿気拡散率について，セメント技術年報 XV，p. 274～278，(1961)
- 8) 木村建一著：建築設備基礎理論演習，学献社，(1970)