

報告 屋外に暴露したコンクリートの含水率モニタリング結果

古賀 裕久^{*1}・渡辺 博志^{*2}

要旨：屋外に暴露したコンクリート供試体の含水率変化を、埋め込み型のセラミックセンサおよびコンクリート表面から測定できる高周波容量式含水率測定装置を用いて、約2年間にわたって断続的にモニタリングした。その結果、コンクリート内部の含水状態に季節的な変動が見られた。また、コンクリートの品質によって吸水・乾燥の影響を受けやすい表面の範囲に違いがあることが確認された。

キーワード：含水率, 非破壊試験

1. はじめに

硬化コンクリートを対象とした非破壊試験には、測定結果がコンクリートの含水状態の影響を受けるものが少なくない。しかし、実建造物の調査では、含水状態を完全に調整することは困難であり、含水率を適切に仮定することが必要となる。また、硬化コンクリート中の鉄筋の腐食速度がコンクリートの含水状態によって変化することなどから、建造物の耐久性評価の観点からも、含水率を適切に評価できる方法が求められている。しかし、現状ではコンクリートの含水率を簡易かつ精度良く測定できる方法はなく、使用環境におけるコンクリートの含水状態やその変化については、十分には明確でない。

そこで、屋外にあるコンクリートの含水状態について目安となるデータを得るため、水セメント比の異なる供試体を暴露し、約2年間にわたって断続的に含水率の測定を行った。あくまで一つの環境下における例にすぎないが、長期にわたって含水率をモニタリングした事例報告は少ないので、ここにその結果を報告する。なお、本報告中での含水率は、絶乾状態の試料質量に対する、試料に含まれる水の量の比とする。

2. 実験方法

2.1 含水率測定方法

(1) セラミックセンサ法

湯浅ら¹⁾が開発した含水率測定方法で、コンクリート中に埋め込んだセラミックセンサ（以下、センサー、図-1）の電気抵抗や静電容量がコンクリートの含水率の変化に追従して変化することを利用したものである。

センサーの測定は、抵抗・コンデンサが並列接続された回路を仮定し、周波数1kHzで、LCRメータを用いて行った。測定結果は、測定時の供試体の温度を考慮し、センサーの温度が20°Cの場合の測定値となるよう補正した。

センサーの測定結果を用いた含水率の推定にはコンクリートの配合・養生条件ごとに作成した推定式（式(1)）を用いた。推定式中の定数は、文献1)に示された予備試験方法により定めた。この予備試験は、40mm立方のモルタル供

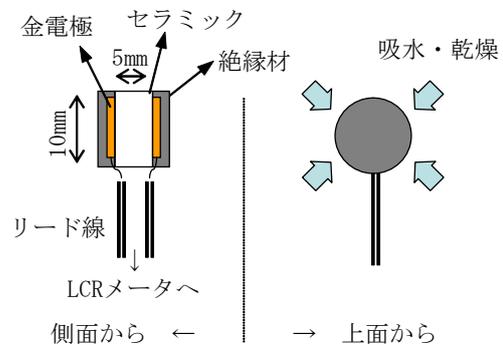


図-1 セラミックセンサ

*1 (独) 土木研究所 技術推進本部構造物マネジメント技術チーム 工修 (正会員)

*2 (独) 土木研究所 技術推進本部構造物マネジメント技術チーム 工修 (正会員)

試体を作成して、内部に埋め込んだセンサーの電気抵抗測定と加熱乾燥法による含水率測定を行い、両者の関係を明らかにするものである。

$$W_m = a(1 - (1 - \exp(-b \times \log(10 \times R_s)^c))) \quad (1)$$

ここに、 W_m ：コンクリート中のモルタル分の含水率 (%)

R_s ：センサーの抵抗 (k Ω)

a, b, c：予備試験で定める定数

(2) 高周波容量法

含水率の大小によりコンクリートの静電容量が変化することを利用した測定方法で、コンクリート表面から非破壊での測定が可能である。本研究では、測定期間の後半に、図-2に示す装置を用いて測定を行った。含水率測定専用の装置で、静電容量の測定結果から含水率を推定する方法の詳細は明らかにされていない。

(3) 加熱乾燥法

コンクリートを約 105℃の乾燥炉中で加熱して水分を蒸発させ、加熱前後の質量変化から含水率を算出する方法である。本研究では、セラミックセンサ法による含水率測定結果の妥当性

を検証する際に、これを用いた。

2.2 コンクリート供試体

コンクリート供試体の寸法は、300 × 300 × 500mm のブロック型とし、配合は、水セメント比 25, 50, 75% の三種類とした (表-1)。

供試体の内部には、暴露するコンクリート表面からの深さが、10, 30, 50, 100, 200mm となる位置にセンサーを埋め込んだ。個体差を考慮して、それぞれの深さに 3 個のセンサーを配置した (図-3)。

暴露面は、コンクリートの打設時に型枠側面であった面とした。供試体は、暴露面を除いて木製型枠を取り外さず、そのまま暴露した。

2.3 暴露状況

暴露場所は茨城県つくば市とした。含水率の測定期間には前期 (2000 年 6 月 ~ 12 月) と後期 (2001 年 6 月 ~ 2002 年 9 月) がある。

測定期間前期におけるコンクリート供試体の暴露状況を図-4に示す。暴露面はいずれもほぼ水平で、周囲の建造物等による日射・降雨への影響は大きくないものと考えられる。測定期間後期からは、暴露面の方向の影響を見るため、供試体 No.1 を図-4中の点線の位置に移設し、

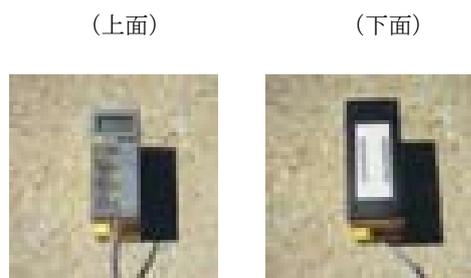


図-2 高周波容量法の測定装置

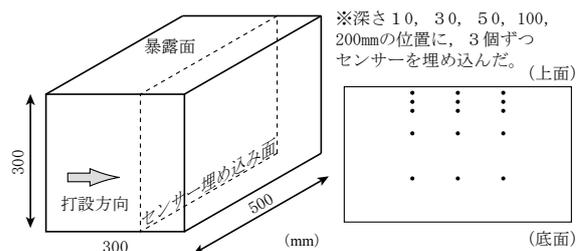


図-3 セラミックセンサ埋め込み位置

表-1 コンクリート供試体の配合

供試体 No. ^{*1}	水セメント比 (%)	単位量 (kg/m ³)				養生条件	材齢28日圧縮強度 (MPa)	
		水	セメント	砂	砂利		水中養生	気中養生
1	50	160	320	784	1023	水中 ^{*2}	50.6	—
3	25		640	696	950		気中 ^{*2}	96.5
4	50		320	784	1023	—		34.3
5	70		229	896	999	33.4	22.4	

※1 供試体 No.2 は、今回の実験には使用しなかった。

※2 気中養生の供試体は、打設後 2 日間湿布養生し、その後、約 4 ヶ月間室内で保管した。さらに、1 ヶ月間水中で保管し直後に暴露した。水中養生の供試体は、打設後暴露開始までの約 5 ヶ月間、水中で養生した。

暴露面を建物側に向けほぼ垂直とした。他の供試体については位置を変更せず暴露を続けた。

暴露箇所に最も近いアメダス観測所で測定された、暴露期間中の日平均気温・降水量を図-5に示す。

3. 実験結果

3.1 セラミックセンサ法

(1) 水セメント比 50%の場合

コンクリート供試体 No.4 の含水率測定結果を図-6に示す。測定結果は同一深さにある3つのセンサーの平均値とし、明らかに異常な値を示したものについては除外して算出した。

測定期間前期（2000年6月から）は、約1箇月間水中で保管した直後であったため、供試体内部に含水率の差がなく、十分に吸水していた。その後8月中旬までは、供試体が表面から急速に乾燥していく様子が見られた。夏期にはほぼ一日晴天の日も多く、供試体の温度も40℃程度まで上昇したため乾燥が進んだものと考えられる。一方、まとまった雨が降ると（例えば2000年7月25、26日）、コンクリート表面付近の含水率が約1%上昇することもあった。

九月中旬以降は降雨が多く、暴露面から10mmの深さの含水率は、上下を繰り返した。一方、深さが30mm以上の測定箇所では、含水率が3.5%程度で安定するようになった。11月下旬以降は降雨がほとんどなく、再度供試体の表面から乾燥していく傾向が認められ、供試体内部には深さ方向に含水率の違いが生じた。

測定期間後期は、前期の約半年後（2001年6月）から再開し、2002年1月以降の冬季および春季にも測定を継続した。1月から5月までの間、暴露面から10mmの深さの測定箇所では降雨による吸水と乾燥が繰り返される様子が観察された。一方、深さ30mm以上の測定箇所では、含水率に顕著な変化がなかった。6月になると梅雨のため降水量が多くなり、深さ10mm～100mmの箇所での含水率がほぼ同じになった。夏期および秋期の含水率変化は、2001年、2002

年ともに2000年とほぼ同様な傾向が見られた。

このようにコンクリートの含水状態には、季節による周期的な変化が認められた。また、暴露面から深さ10mmの位置に埋め込んだセンサーでは、降雨による吸水とその後の自然乾燥の



※点線は、2001年以降、供試体 No.1 を移設した場所

図-4 供試体暴露状況

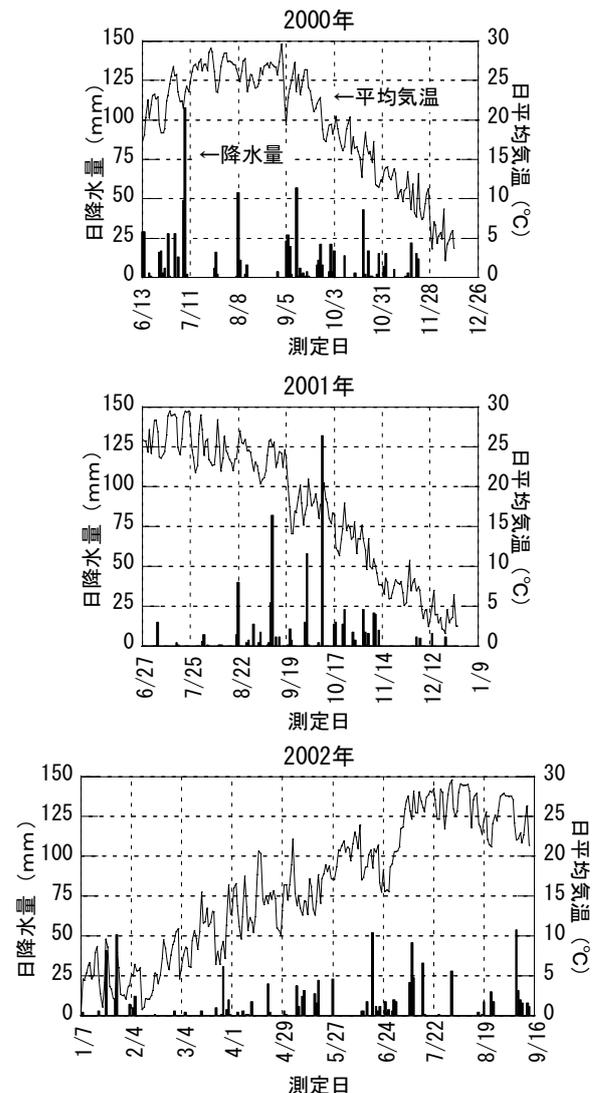


図-5 気象データ（気象庁提供アメダス観測データ、つくば）

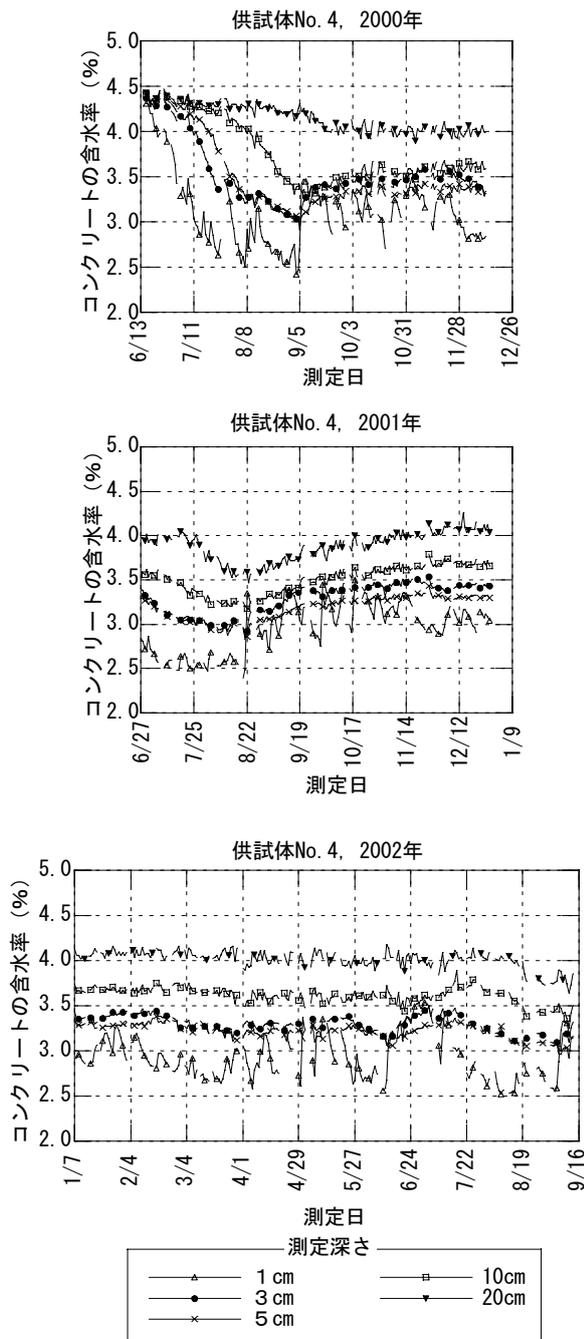


図-6 含水率測定結果の季節変動

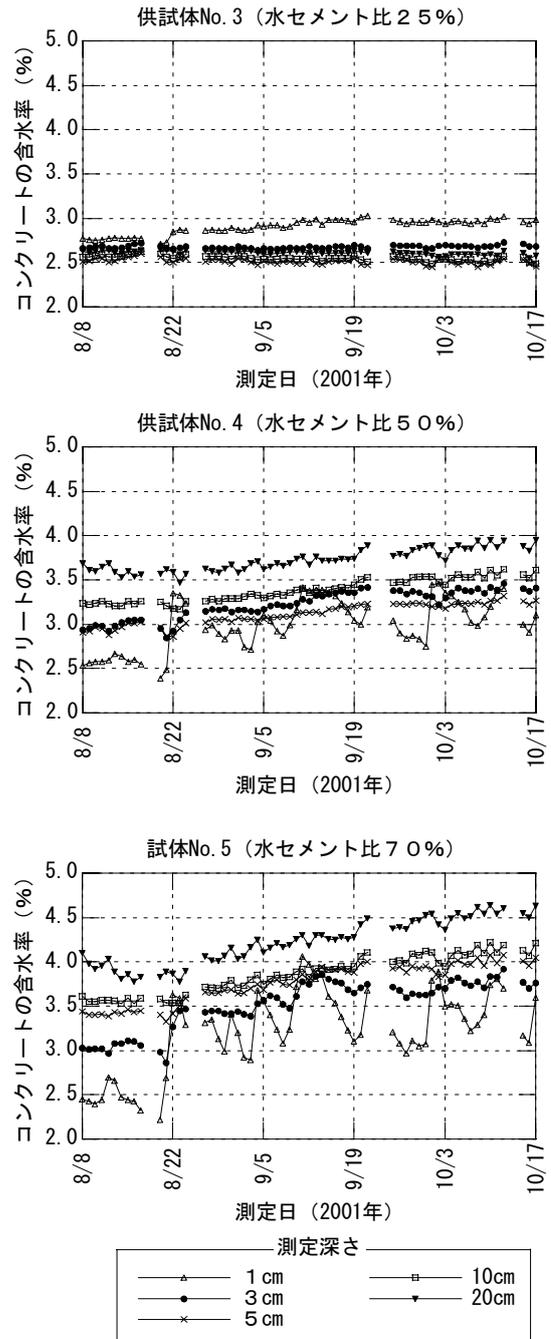


図-7 コンクリートの品質による比較

繰り返しが明確に認められた。

(2) コンクリートの品質と含水率

供試体 No.5 の含水率変化は、季節による変化の点では、供試体 No.4 と類似していた。ただし、含水率の変動が大きいこと、暴露面から 30mm の深さの測定箇所でも降雨の影響をより明確に受けていることが観察された。一例として、2001 年 8 月～10 月の測定結果を図-7 に示す。このように含水率が大きく変動する範囲

が異なるのは、水セメント比 70% の供試体 No.5 の方がよりポーラスであり、内部の水分移動の速度が速いためと考えられる。

一方、供試体 No.3 では、コンクリートの含水率の変化が明確には見られなかった (図-7)。この理由としては、水セメント比 25% と非常に緻密なコンクリートであり含水率の変化が小さかったことと、供試体内の水分が少なすぎたためセンサーの抵抗が大きすぎ、これを適切に測

定できなかったことが考えられる。なお、測定期間前期では、供試体 No.1 と No.4 の測定結果に大きな違いがなく、養生条件による影響は明確でなかった。

(3) 暴露面の方向と含水率

測定期間後期から暴露面を垂直とした供試体 No.1 の 2001 年の測定結果を図-8 に示す。暴露面の変更後、深さ 200mm の位置の含水率が大きく低下し、その後深さ 100mm の位置とほぼ同程度の値になった。これは、暴露面を日陰側に向けた結果、その裏側の面に直射日光が当たるようになり、木製型枠があるもののこの面から乾燥が進むようになったためと考えられる。

暴露面側のデータを見ると、深さ方向での含水率の差が小さくなっている。これは暴露面に直射日光が当たらなくなったこと、暴露面に付着する雨水の量が少なくなりコンクリート内部へ浸入する水の量が減少したことの双方が原因として考えられる。

(4) 加熱乾燥法による確認

セラミックセンサ法による測定結果の妥当性を検証するため、測定期間後期の後で、供試体の含水率をセラミックセンサ法および加熱乾燥法により測定した。測定結果を表-2 に示す。

供試体 No.4, No.5 については、両法でほぼ同じ測定結果が得られた。また、供試体 No.1 についても、暴露面の方向を変更した結果、供試体 No.4 より含水率が低くなっていたことが確認された。供試体 No.3 については、コンクリートに含まれている水分が非常に少なかったことが明らかになった。

3.2 高周波容量法

高周波容量法によるコンクリート表面からの含水率測定結果を、セラミックセンサ法による測定結果と比較して図-9 に示す。なお、雨天時に測定を行った場合、高周波容量法による含水率測定結果が 8%、10% などと非常に大きな値を示すことがあった。これは、コンクリート表面に水膜があったため、装置の適用範囲を超えていると考えられる。そこで、図では含水

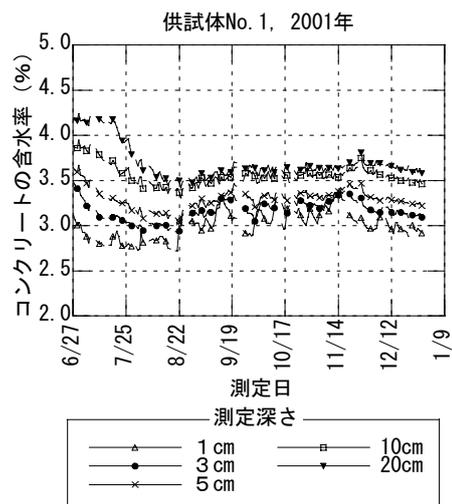


図-8 暴露面を垂直とした供試体の含水率

表-2 加熱乾燥法とセラミックセンサ法の比

測定方法・箇所		各供試体の含水率 (%)			
		No. 1	No. 3	No. 4	No. 5
セラミック センサ法	深さ 1 cm	2.57	2.91	3.24	3.44
	深さ 3 cm	2.98	2.73	3.51	4.17
	深さ 5 cm	3.06	2.59	3.43	4.33
	深さ 10cm	2.88	2.58	3.86	4.36
	深さ 20cm	3.28	2.65	4.06	4.61
加熱乾燥法		2.65	1.16	3.56	4.25

※ 2003 年の 2 月に供試体を暴露場所から撤去し、封緘した上で室内で保管した。その後、2003 年の 7 月に、上の表に示す測定を行った。

※ 加熱乾燥法の乾燥期間は、約 3 週とした。

率 6% までの範囲を表示した。

高周波容量法による測定結果は、測定直前の気象状況によって大きく変動し、セラミックセンサ法で深さ 10mm の箇所を測定した結果と傾向がよく似ている。また、暴露面を垂直にした供試体 No.1 でも、暴露面が水平な供試体 No.4 と変動の程度が近く、降雨量よりも降雨の有無が測定結果に大きく影響している。これらのことから高周波容量法の測定結果はコンクリートのごく表面付近の含水率変化をとらえているものと考えられる。

また、高周波容量法には、水セメント比が小さいほど測定結果の含水率が大きくなる傾向が見られ、その結果、特に供試体 No.3 では、加熱乾燥法やセラミックセンサ法で測定した結果

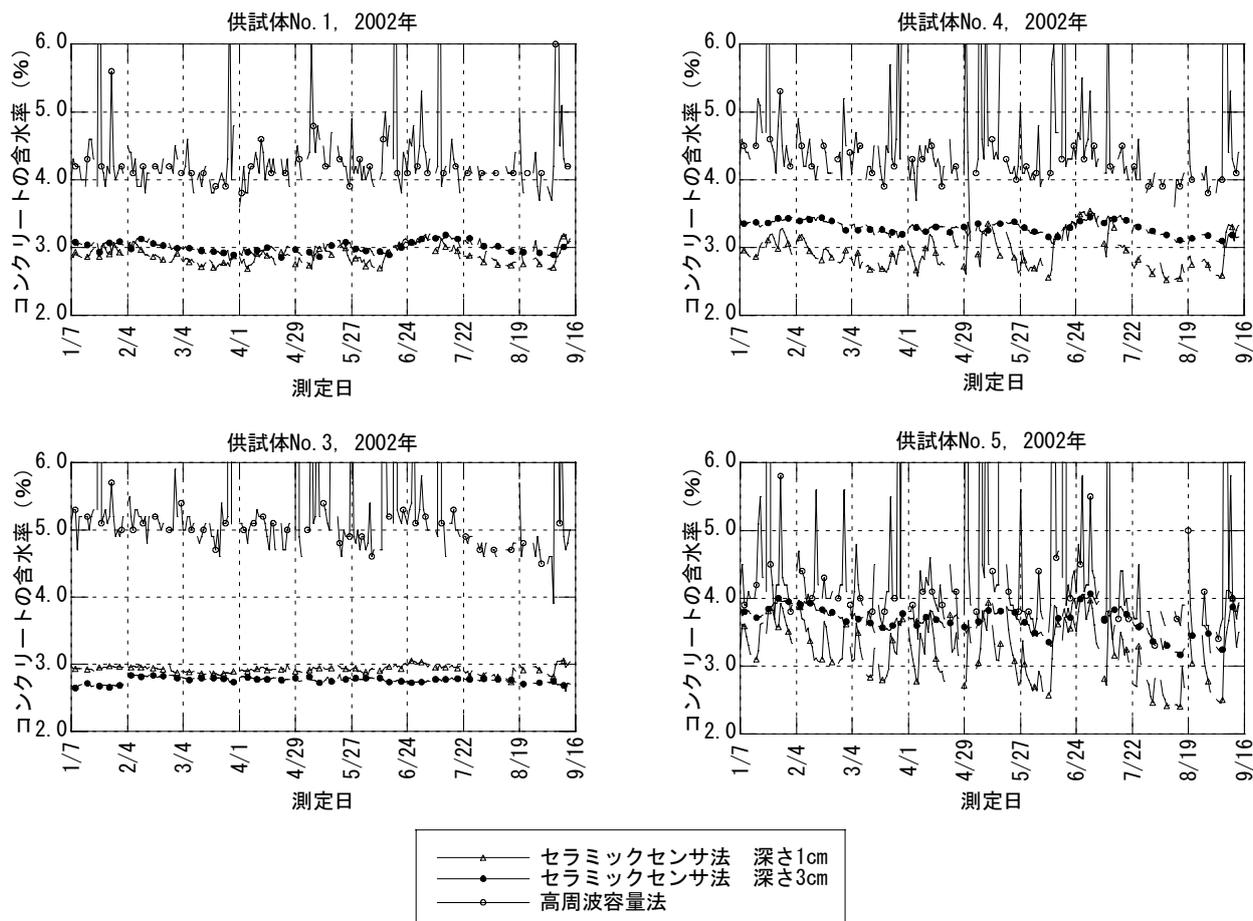


図-9 高周波容量法とセラミックセンサ法の比較

と大きく異なる値が得られた。高周波容量法については、配合の異なるコンクリートの測定結果を相互に比較することは必ずしも適当でないと考えられる。

4. まとめ

屋外に暴露したコンクリート供試体の含水率を長期間にわたって測定し、次の結果を得た。

- (1) セラミックセンサ法による測定で、コンクリート内部の含水率変化の季節的な変動を観測することができた。
- (2) 含水率が大きく変化する範囲には、水セメント比による違いが見られた。
- (3) 加熱乾燥法による検証の結果、水セメント比 50%、70%の供試体については、セラミックセンサ法による測定で概ね正しい含水率が測定できていたものと考えられる。一方、水セメント比 25%の供試体では、セラミッ

クセンサ法による評価が困難であった。

- (4) 高周波容量法の測定結果は、コンクリートのごく表面付近の含水状態を反映しているものと考えられる。
- (5) 高周波容量法の測定結果は、水セメント比の小さいコンクリートほど、含水率が大きく測定される傾向があった。

謝辞

セラミックセンサ法による含水率測定については日本大学の湯浅助教授から、ご指導いただきました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 湯浅昇, 笠井芳夫, 松井勇: 埋め込みセラミックセンサの電気的特性によるコンクリートの含水率測定方法の提案, 日本建築学会構造系論文集, 第 498 号, pp.13-20, 1997.8