

論文 繰返し載荷除荷曲線を用いたコンクリートの含水率推定手法に関する研究

尾上 幸造^{*1}・下中村 圭太^{*2}・鋤田 諒^{*3}・中澤 隆雄^{*4}

要旨： 上限応力を一定とした繰返し載荷除荷において、初回時の損失エネルギーに占めるひび割れ進展エネルギーの割合 E_{crac}/E_{il} は、コンクリートの含水率と負の相関関係にあることが判明している。このことを踏まえ、繰返し載荷除荷曲線よりコンクリートの含水率を推定する手法に関し基礎的な検討を行った。水セメント比 45%, 55%, 65%のコンクリート供試体を作製し、含水率を数段階に変化させて繰返し載荷除荷試験を実施した結果、 E_{crac}/E_{il} とコンクリートの含水率との間には負の累乗関係が存在すること、および両者の関係は水セメント比によらず単一の回帰式で表現可能であること等が明らかとなった。

キーワード： 含水率、乾燥法、誘電法、繰返し載荷除荷曲線、損失エネルギー、ひび割れ進展エネルギー

1. はじめに

コンクリートは主に圧縮材として用いられるため、その圧縮強度は基本的かつ重要な指標であるが、乾湿状態の違いによって圧縮強度は大きく変動する。特に、湿潤状態時におけるコンクリートの圧縮強度が著しく低下することが指摘されている。一般に湿潤状態時におけるコンクリートの静的圧縮強度は乾燥状態時のそれよりも 10~20%程度低下する¹⁾。

これを受けて、現行の JIS A 1107「コンクリートからコアの採取方法及び強度試験方法」では乾湿状態の影響を排除したうえで試験を実施することが推奨されている。それによると、「コア供試体は、試験のときまで 20±2℃の水中に 40 時間中以上漬けておくと、試験時に供試体の乾湿の条件をほぼ一定にすることができる」との記述があり、コンクリート構造物からのコア供試体を水中浸漬させ湿潤状態にすることで乾湿状態の影響を排除できるとされている。しかし、前述の通りコンクリートの圧縮強度は乾湿状態の影響を大きく受けるため、実際の現場におけるコンクリート構造物も乾湿状態の影響を大きく受けている。そのため、コア供試体より得られる圧縮強度は現場におけるコンクリート構造物の乾湿状態の影響を反映した値に補正するか、あるいは圧縮強度の試験結果の報告に際し、コンクリートの品質を表すパラメータの一つとして含水率に関する情報も併示することが望ましいと考えられる。

コンクリートの含水率を測定する代表的な方法として、乾燥法ならびに非破壊型の高周波容量（誘電率）式水分計を用いて測定を行う誘電法が挙げられる。しかし、乾燥法については高温環境下におけるコンクリートの

質量変化が長期にわたる²⁾ため、迅速性の観点からは適用が限定される。また、誘電法については材料・配合・材齢の違いによって誘電率と含水率の関係（検量線）が異なることや、対象物の表層における一部分しか測定できないこと等が想定される。そこで、コンクリートの基本的かつ重要な物理的性質である圧縮強度の測定時にしばしば併せて測定される「応力-ひずみ曲線」から含水率を推定するためのパラメータを得ることができれば、即時性という点で有効であり、さらにそのパラメータがコンクリートの力学的特性と密接に関連していることから有意義であると考えられる。

岡田ら³⁾は、コンクリートの圧縮破壊過程をエネルギー変換過程としてとらえる考え方を示した。ある一回の載荷除荷による応力-ひずみ曲線と各エネルギーの関係ならびに上限応力を一定とした繰返し載荷除荷時の損失エネルギーの変化を図-1 に示す。損失エネルギー E_i は初回時で最も大きく、2 サイクル目以降は大幅に減少する。なお、コンクリートの連続繰返し載荷に伴う変形挙動の重要な変化はほぼ 5 サイクル目までに収束する⁴⁾と報告されている。収束したエネルギーの大部分は液相での粘性摩擦や固相内でのずれなどに使われ、熱エネルギーに変換されることが考えられる。初回時においてもほぼこれに等しいエネルギーが熱エネルギーに変換されたと仮定すると、初回の損失エネルギー E_{il} を、ひび割れの進展に使われたエネルギー E_{crac} と摩擦熱などに使われたエネルギー E_{fric} とに分離できる。

実験⁵⁾の結果、 E_{crac} は E_{il} の大きさに比例して増加するが、 E_{il} に占める E_{crac} の割合 E_{crac}/E_{il} は、コンクリートの配合および含水率が同一であれば上限応力の大きさに

*1 宮崎大学工学部 土木環境工学科助教 博士（工学）（正会員）

*2 宮崎大学工学部 土木環境工学科（非会員）

*3 宮崎大学工学部 土木環境工学科（非会員）

*4 宮崎大学工学部 土木環境工学科教授 工博（正会員）

よらず常に一定値をとり、供試体の含水率が高いほど小さくなることが明らかとなった。これは、含水率の低いコンクリートでは水分子の吸着水が減ることによりひび割れ進展に必要な表面エネルギーが増加するため、または固相間から絞り出される吸着水が少ないことなどによって水分子の移動に基づく変形よりも微細ひび割れの進展に基づく変形が卓越するため³⁾と考えられる。

以上の実験結果を踏まえ、本研究では、低ひずみ領域における少数回の繰返し載荷除荷試験により得られる E_{crac}/E_{il} の値からコンクリートの含水率を推定する手法について基礎的な検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料と配合条件および供試体の形状寸法

普通ポルトランドセメント（密度 3.15g/cm^3 ）、石灰石砕砂細骨材（表乾密度 2.66g/cm^3 ）、石灰石砕砂粗骨材（表乾密度 2.68g/cm^3 ）を用いた。また、リグニンスルホン酸系の AE 減水剤（密度 1.25g/cm^3 ）およびアルキルアリスルホン酸系の AE 剤を使用した。

異なる水セメント比間で試験結果の比較を行うため、水セメント比 45%、55%、65% の 3 配合の供試体を作製した。供試体の配合条件と単位量を表-1 に示す。配合は、目標スランプ $10\pm 2.5\text{cm}$ 、目標空気量 $4.5\pm 1.5\%$ の範囲に収まるよう試し練りを行って決定した。

供試体の形状寸法は $\phi 75\times 150\text{mm}$ の円柱とした。

2.2 供試体含水率の調整

供試体含水率の調整手順を図-2 に示す。同一バッチのコンクリートから供試体を 30 本作製し、打設後 24 時間で脱型し、その後 90 日間の水中養生を施した。その後 5 日間の気中乾燥を経て 7 日間の 90°C 炉乾燥を施した直後に繰返し載荷除荷試験を実施するものを供試体グループ D とした。供試体グループ D 以外の残った供試体は 90°C 炉乾燥後に 10 日間の水中浸漬を施した。この水中浸漬の直後に繰返し載荷除荷試験を実施するものを供試体グループ W とした。供試体グループ D、W 以外の残った供試体について、7 日間および 14 日間、室内で気中乾燥させた。気中乾燥 7 日目に繰返し載荷除荷試験を実施するものを供試体グループ A1、気中乾燥 14 日目に繰返し載荷除荷試験を実施するものを供試体グループ

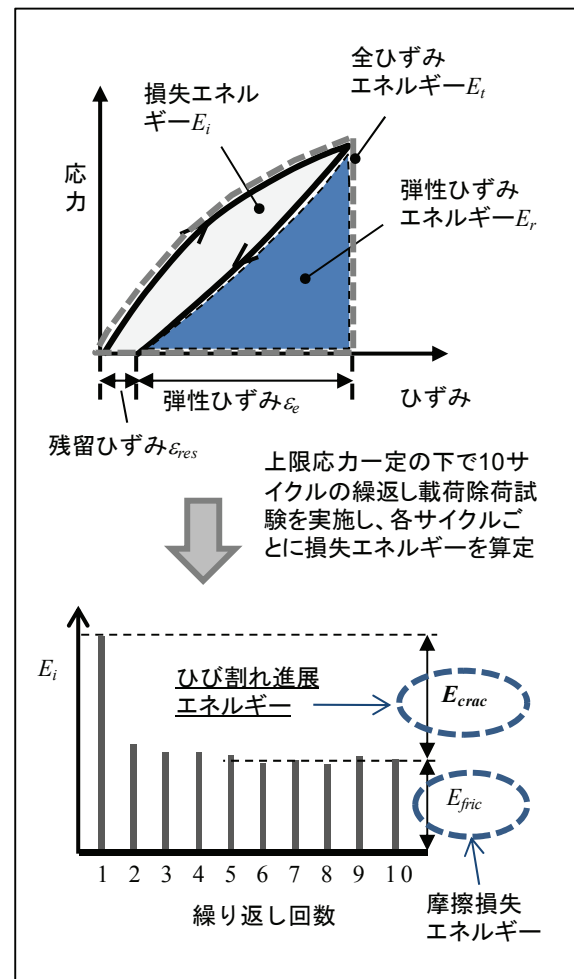


図-1 各種損失エネルギーの算定方法

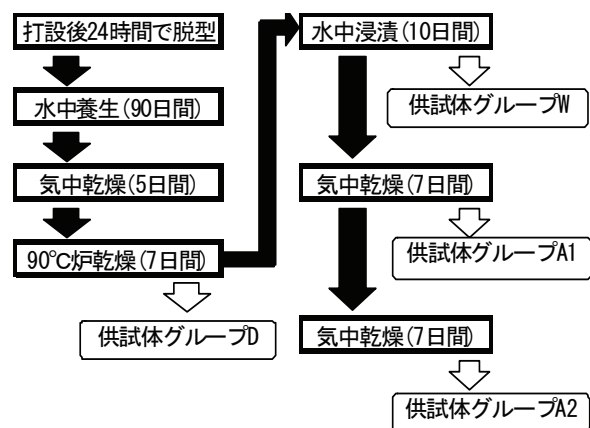


図-2 供試体含水率の調整手順

表-1 供試体の配合条件と単位量

水セメント比 W/C[%]	細骨材率 s/a[%]	水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	AE減水剤	AE剤
		[kg/m ³]					[ml/m ³]
45	42	165	367	780	1086	1.147	14.68
55	44	165	300	842	1080	0.938	12.00
65	46	165	254	899	1063	0.794	10.16

A2とした。以上のような手順により、同一配合につき供試体グループD、W、A1、A2という4段階の異なる含水率を有する供試体を作製した。含水率の推定パラメータを求めるための試験で用いた各供試体グループの本数は3である。ただし、後述するように繰返し載荷除荷試験の直前に上限応力の大きさを決定するため1本の供試体を用いて圧縮強度を測定した。そのため、同一含水率について計4本ずつ供試体を用意した。水セメント比45%、55%、65%の3配合について各1回の含水率調整を行った。なお、供試体グループD、A2、A1、Wの順に供試体の含水率は低いものと予想される。

2.3 供試体含水率の測定

本研究では、誘電法ならびに乾燥法の2種類の方法によりコンクリートの含水率を測定した。

誘電法では、市販の高周波容量式水分計（kett 社製 HI-520）を用いて繰返し載荷除荷試験の前後に供試体の両端面の含水率を測定した。本研究で用いた高周波容量式水分計は、本体と検出部を一体化したハンディタイプであり、コンクリート、人工軽量骨材コンクリート、石膏ボード、モルタルなどの含水率測定に適している。検知部を測定物に押し当てると、含水率がデジタル表示される。その測定原理は、水分による誘電率（高周波容量）の変化を利用するものである。各種材料の誘電率は、空気を1とした場合に10以下であるが、水の誘電率は約80と各種材料のそれに比べて非常に大きな値を示し、各種材料が水分を含むことによって見かけの誘電率が增加する。そのため、あらかじめ求めておいた含水率と誘電率との関係を用いることで、誘電率より含水率を推定できる。なお今回、測定モードを「コンクリートモード」、部材厚さダイヤルを「40mm」、温度補正ダイヤルを「AUTO」に設定して測定を行った。

乾燥法では、載荷試験の前後に供試体の質量測定を行い、繰返し載荷除荷試験後に約90日間の90℃炉乾燥を施した。式(1)に乾燥法による含水率の算定式を示す。

$$\text{含水率 } Z (\%) = (m - m_D) / m_D \times 100 \quad (1)$$

ここに、 m は繰返し載荷除荷試験の前後に測定された供試体質量の平均値（単位：g）、 m_D は繰返し載荷除荷試験後に90℃炉乾燥を約90日間施した後の供試体質量（単位：g）である。

2.4 繰返し載荷除荷試験方法

繰返し載荷除荷試験を実施するにあたっては、電気油圧サーボ式の疲労試験機（静的容量：300kN）を使用した。疲労試験機を用いたのは、通常の耐圧試験機と比較して、載荷応力の上下限値や載荷速度の設定が容易なためである。なお、既往の研究⁵⁾では繰返し載荷除荷試験に通常の耐圧試験機を使用した方が、どちらの試験機を用

いても実験結果には影響しないと判断した。ただし、後述するように、繰返し載荷除荷試験後の残存圧縮強度の測定は耐圧試験機（容量：2000kN）を用いて行った。

載荷速度は載荷過程・除荷過程ともに毎秒0.2N/mm²とした。上限応力の決定に際しては、同等の含水率に調整した1本の供試体について圧縮強度を測定し、その30%となる応力とした。既往の研究⁵⁾より、繰返し載荷の上限応力比の大きさは、供試体の配合や含水率が同等であれば E_{crac}/E_{il} の値に影響を及ぼさないことが明らかとなっており、上限応力の相違は本実験結果に何ら影響しない。なお、下限応力は0N/mm²とした。

検長60mmのワイヤストレインゲージを2枚貼付し、0.4N/mm²毎に荷重および縦ひずみをデータロガーにて計測した。供試体グループWについては、繰返し載荷除荷試験中に水分が蒸発し、顕著な質量減少が起こることが想定されたため、アクリル水槽に水を満たし、その中に供試体を浸した状態で試験を実施した。この際、ひずみゲージの金属部分が水と接触することで計測に支障をきたすことを避けるため、貼付したひずみゲージの表面を専用の防水テープで完全にコーティングした。その他の供試体グループD、A1、A2については、気中で繰返し載荷除荷試験を実施した。繰返し載荷除荷試験は10サイクル実施し、図-1の方法により各種損失エネルギーを求めた。以下、本論文では各種損失エネルギー値（単位：N/m²）に供試体の体積（単位：m³）を乗じ、供試体あたりの値に換算した値（単位：N・m）で示す。

2.5 残存圧縮強度の測定

繰返し載荷除荷試験後、耐圧試験機を用い供試体の残存圧縮強度を測定した。今回は最大応力の30%程度の低ひずみ領域で繰返し載荷を行っており、先行する載荷履歴が残存強度に及ぼす影響は小さいと判断した。

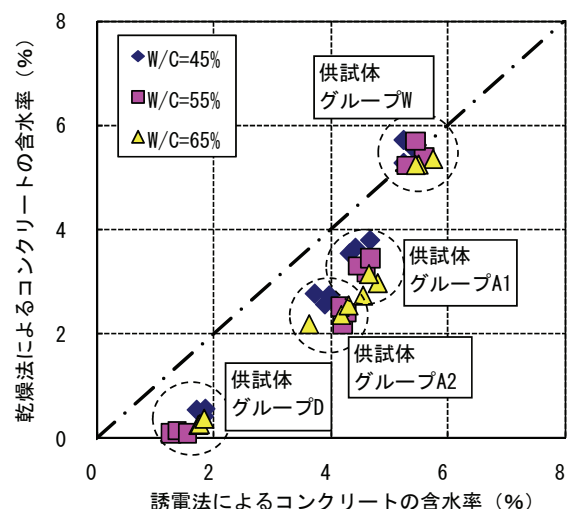


図-3 乾燥法と誘電法による含水率測定結果の比較

3. 実験結果

3.1 乾燥法と誘電法による含水率測定結果

図-3 に乾燥法と誘電法による含水率測定結果の比較を示す。なお、誘電法による含水率の測定結果は、繰返し載荷除荷試験の前後に供試体の両端面で測定された 4 つの値の平均値で示す。供試体グループ W については乾燥法、誘電法ともにほぼ同等の含水率を得た。しかし、供試体グループ A1, A2, D については誘電法により測定した含水率が乾燥法により測定した含水率よりも高い含水率を示した。なお、水セメント比の違いによる顕著な影響はみられない。

このように、高周波容量式水分計を用いる場合には、乾燥状態にあるコンクリート供試体の含水率について、乾燥法で求められる値よりも若干高めに評価する可能性が示唆される。ただし、本実験結果は、限られた配合・供試体形状寸法についてのものであり、より明確な結論を得るためには今後のデータの蓄積が不可欠である。一方、乾燥法は含水率の定義に準じた直接的な方法であることから、本研究では、乾燥法により測定した含水率を用いて試験結果の整理を行うこととした。

3.2 残存圧縮強度の測定結果

図-4 に繰返し載荷除荷試験後に実施した残存圧縮強度の測定結果と乾燥法により測定した含水率の関係を示す。なお、残存圧縮強度と乾燥法により測定した含水率は、1 つの配合および供試体グループにつき 3 本の供試体の試験結果から得られた値の平均値で示してある。既往の知見と同様に、含水率が高いほど残存圧縮強度は低下するが、供試体グループ D と供試体グループ W の残存圧縮強度の差は、水セメント比が高いほど増加することが認められ、水セメント比 65%においては約 20%程度の差があった。本試験結果からも、コンクリートの圧縮強度が乾湿状態の影響を大きく受けることが再確認される。

3.3 初回載荷時の損失エネルギーに占めるひび割れ進展エネルギーの割合 E_{crac}/E_{i1} の算定結果

繰返し載荷除荷試験により得られた繰返し載荷除荷曲線および繰返し載荷除荷の回数にともなう損失エネルギーの変化の例として、水セメント比 45%の供試体グループ D の 1 供試体についての結果を図-5、図-6 に示す。既往の研究³⁾⁻⁵⁾で明らかとなっているのと同様に、初回載荷時の損失エネルギーが顕著に大きく、2 サイクル目以降の損失エネルギーは大きく減少し、5 サイクル程度でほぼ一定値に収束する結果が得られた。

全ての供試体について繰返し載荷除荷試験により得られた初回載荷時の損失エネルギー E_{i1} 、摩擦損失エネルギー E_{fric} 、ひび割れ進展エネルギー E_{crac} 、および初回載荷時の損失エネルギーに占めるひび割れ進展エネルギー

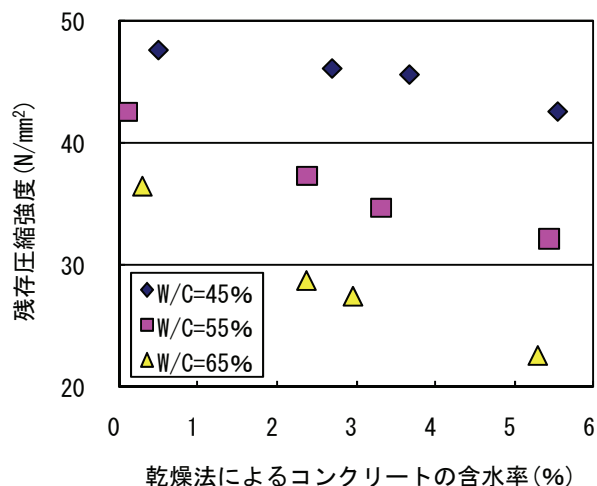


図-4 乾燥法によるコンクリートの含水率と残存圧縮強度との関係

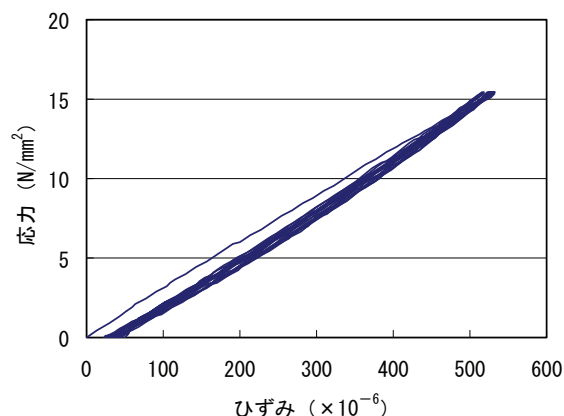


図-5 繰返し載荷除荷曲線の例 (W/C=45%, 供試体グループ D)

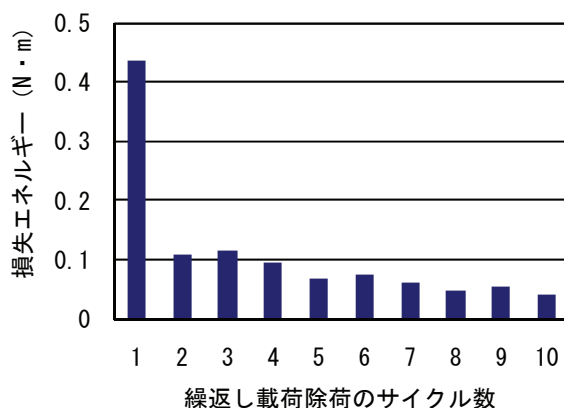


図-6 繰返し載荷除荷にともなう損失エネルギーの変化例 (W/C=45%, 供試体グループ D)

の割合 E_{crac}/E_{i1} の値を表-2 に示す。既往の研究⁵⁾により、 E_{crac}/E_{i1} の値は配合と含水率が同一であれば上限応力の大きさによらず常に一定値をとり、供試体の含水率が高いほど小さくなることが明らかとなっている。本実験結果に関し、いずれの水セメント比についても、 E_{crac}/E_{i1} の値は供試体グループ D で 0.85~0.90 と最も大きく、供

表-2 E_{i1} , E_{fric} , E_{crac} および E_{crac}/E_{i1} の算定結果

W/C [%]	供試体 グループ	供試体No.	乾燥法による 含水率の 平均値 [%]	E_{i1}	E_{fric}	E_{crac}	E_{crac}/E_{i1}	E_{crac}/E_{i1} の平均値
				[N・m]	[N・m]	[N・m]		
45	D	1	0.51	0.44	0.06	0.38	0.87	0.85
		2		0.42	0.06	0.35	0.85	
		3		0.39	0.06	0.33	0.85	
	A2	1	2.70	0.19	0.06	0.13	0.68	0.66
		2		0.17	0.06	0.11	0.65	
		3		0.18	0.06	0.12	0.65	
	A1	1	3.67	0.24	0.08	0.16	0.68	0.68
		2		0.23	0.08	0.16	0.67	
		3		0.24	0.07	0.16	0.69	
	W	1	5.53	0.10	0.04	0.06	0.57	0.64
		2		0.07	0.03	0.05	0.66	
		3		0.10	0.03	0.07	0.69	
55	D	1	0.12	0.19	0.02	0.16	0.87	0.85
		2		0.25	0.04	0.22	0.85	
		3		0.26	0.04	0.22	0.83	
	A2	1	2.37	0.17	0.06	0.11	0.65	0.65
		2		0.20	0.07	0.13	0.66	
		3		0.20	0.07	0.13	0.64	
	A1	1	3.31	0.13	0.04	0.09	0.70	0.67
		2		0.13	0.05	0.08	0.65	
		3		0.15	0.05	0.10	0.65	
	W	1	5.43	0.09	0.04	0.05	0.60	0.63
		2		0.09	0.03	0.06	0.65	
		3		0.10	0.04	0.07	0.65	
65	D	1	0.29	0.11	0.01	0.10	0.93	0.90
		2		0.06	0.01	0.06	0.90	
		3		0.09	0.01	0.07	0.86	
	A2	1	2.36	0.15	0.05	0.10	0.64	0.67
		2		0.20	0.07	0.14	0.67	
		3		0.20	0.06	0.14	0.69	
	A1	1	2.95	0.17	0.05	0.12	0.70	0.66
		2		0.11	0.04	0.07	0.64	
		3		0.12	0.04	0.08	0.65	
	W	1	5.29	0.07	0.02	0.06	0.78	0.68
		2		0.06	0.02	0.04	0.68	
		3		0.04	0.02	0.02	0.57	

試体グループ W で 0.63～0.68 と最も小さくなった。その中間的な含水率の供試体グループ (A1 および A2) については、含水率と E_{crac}/E_{i1} との関係が逆転しているところもあるものの、基本的には含水率が高いほど E_{crac}/E_{i1} の値は低下すると考えられる。

3.4 E_{crac}/E_{i1} と乾燥法より測定した含水率の関係

E_{crac}/E_{i1} と乾燥法より測定した含水率の関係について、それぞれの対数を取り、プロットしたものを図-7 に示す。両者の関係は水セメント比によらず負の 1 次式で近似でき、 E_{crac}/E_{i1} と乾燥法より測定した含水率の関係は累乗関数で表せることが明らかとなった。その関係を図-8 に示す。この結果、 E_{crac}/E_{i1} よりコンクリートの含水率を推定する回帰式を得たので式 (2) に示す。

$$Z=0.07(E_{crac}/E_{i1})^{-9.24} \quad (2)$$

ここに、Z は推定含水率 (%) である。

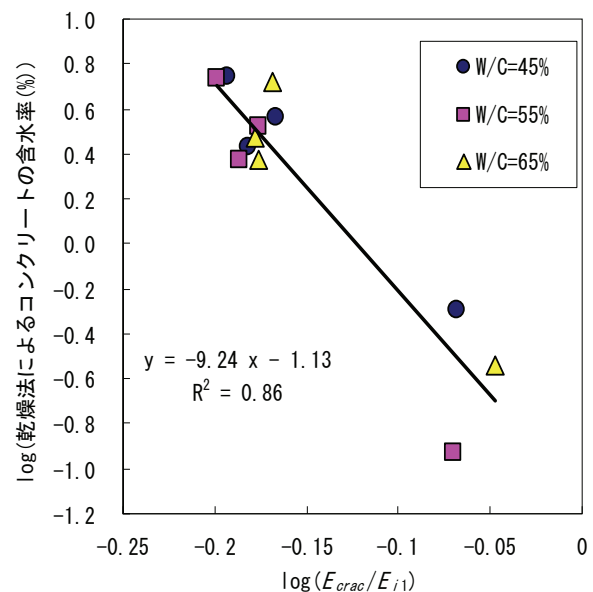


図-7 E_{crac}/E_{i1} と含水率の関係

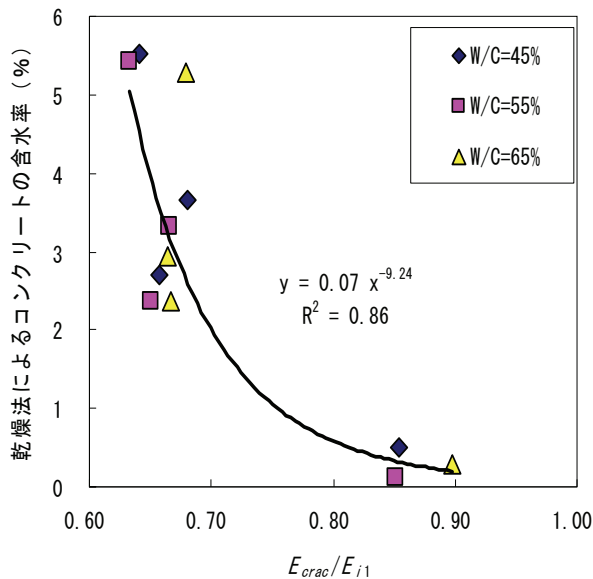


図-8 E_{crac}/E_{i1} と含水率の関係

表-3 分散分析結果

変動要因	変動	自由度	分散	分散比
群間	3.76	2	1.88	$F_0 = \frac{1.88}{3.05} = 0.616$ $F_{95}(2, 33) = 3.28 > F_0$
群内	100.69	33	3.05	
合計	104.46	35		

ここで注意すべきことは、式 (2) は異なる 3 つの水セメント比の供試体を用いて繰返し載荷除荷試験を実施したことにより得た回帰式ということである。水セメント比別に回帰式を求めた方がより精度の高い含水率の推定式を得られるであろう。しかし、実用性を考慮すれば水セメント比によらず 1 つの回帰式で近似できる方が含水率を推定する式としては望ましいと考えられる。よって、水セメント比によらず回帰式 (2) を用いて良いかどうか検討しなければならない。

そこで、回帰式 (2) から得られる推定値に水セメント比間で差があるかどうかについて検定を行った。具体的には、推定値と実測値の距離 (残差の絶対値) に水セメント比間で有意差があるか、危険率 5% で一元配置法による分散分析を行った。分散分析にあたり次の帰無仮説 H_0 、対立仮説 H_1 を立てた。

帰無仮説 H_0 : 水セメント比間で推定値と実測値に有意差はない

対立仮説 H_1 : 水セメント比間で推定値と実測値に有意差がある

分散分析結果を表-3 に示す。分散比は棄却域には落ちず帰無仮説 H_0 が採択され、推定値と実測値の距離に水セメント比間で差はないとえる。つまり、水セメント比によらず回帰式 (2) を用いて良いといえる。

4. 結論

本研究の範囲内で得られた知見は以下の通りである。

- (1) 高周波容量式水分計を用いる方法は、乾燥状態にあるコンクリート供試体の含水率について、乾燥法で得られる値よりも若干高めに評価する傾向にある。ただし、本実験結果は限られた配合・供試体形状寸法についてのものであり、より明確な結論を得るためには今後のデータの蓄積が不可欠である。
- (2) 繰返し載荷除荷試験後の残存圧縮強度は、供試体の含水率が高いほど低下し、その低下率は水セメント比が高いほど大きくなる。
- (3) 上限応力比を一定とした繰返し載荷除荷曲線より得られる E_{crac}/E_{i1} の値を用いることで、水セメント比によらずコンクリート供試体の含水率を推定できる可能性が示された。

5. 今後の課題

現時点では、配合条件として水セメント比が異なる場合についてのみの検討にとどまっている。今後、使用材料や骨材量の異なる配合条件にて作製された供試体や実際にコンクリート構造物から採取されたコア供試体を用いて試験を実施し、今回得られた推定式の妥当性や実用性について検討を行っていく必要がある。

また、実際の圧縮強度試験において、10 サイクル程度の繰返し載荷を併せて行うことは、容易ではないと思われる。そのため、より少数回の繰返し載荷によって含水率を推定するためのパラメータを簡便に得ることができれば有益であり、今後この点に関しても検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 岡島達雄, 一瀬賢一: コンクリートの強度および弾性定数の含水率依存性, セメント技術年報, Vol.36, pp.211-213, 1982
- 2) 松下博通, 尾上幸造: セメント硬化体内部空隙中の液体の表面張力が圧縮強度に及ぼす影響, コンクリート工学論文集, Vol.17, No.1, pp.9-18, 2006
- 3) 岡田清, 小柳裕, 六郷恵哲: 含水率の異なるコンクリートの圧縮破壊過程に関するエネルギー的考察, 土木学会論文報告集, No.248, pp.129-136, 1976
- 4) Saichi, M. and Shinohe, H.: Elastic Modulus Variation of Concrete Subjected to Low Number Cyclic Loadings, *Proceedings of Concrete under Severe Conditions: Environment and Loading*, Vol. 2, pp. 1675-1683, 1995
- 5) 尾上幸造, 松下博通: 液体浸漬によるコンクリートの静的圧縮強度低下に関するエネルギー的考察, 土木学会論文集 E, Vol.64, No.4, pp.515-525, 2008