

論文 コンクリートの質量変化から求めた推定乾燥収縮率

袴田 豊^{*1}・小山田 哲也^{*2}・高橋 潤吉^{*3}・浪板 克也^{*4}

要旨: コンクリートの乾燥に伴う質量変化から推定乾燥収縮率を求める方法について検討した。第一段階では、質量変化の指標を供試体の体積をベースに求める質量損失量とし、10日から91日までの8期間の質量損失量と182日の質量損失量の関係式を作成した。第二段階では、10日から91日までの質量損失量と乾燥収縮率の関係から二次から四次までの複数の回帰式を求め、採用する回帰式を二次に絞り込んだ。第三段階では、第一段階で作成した関係式を用いて91日までの質量損失量から182日の質量損失量を推定し、推定した質量損失量を二次回帰式に適用することで比較的精度の高い乾燥収縮率を推定できることを明らかにした。

キーワード: 質量変化, 質量損失量, 乾燥収縮率, 推定, 二次回帰式, 双曲線回帰式

1. はじめに

建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事 (以後, JASS5 と表記) ¹⁾ 2009 年版に乾燥収縮率が規定されたのを機に, 岩手県生コンクリート工業組合 (以後, 岩手工組と表記) では, 組合員 52 工場のコンクリートを用いる乾燥収縮率の推定法に着手した。乾燥期間 182 日における乾燥収縮率の推定精度を高めるために, これまで双曲線回帰式を用いる方法 ^{2), 3)}, 重回帰分析に着目した推定法 ^{4), 5)}, 二次回帰式および四次回帰式を用いる推定法 ⁶⁾, 四次回帰式および双曲線回帰式を用いる推定法 ⁷⁾ など, さまざまな推定法を開発している。

ただし, 乾燥収縮率と並行しすべての供試体を対象として質量変化を測定してきたにも関わらず, これを全面的に用いる推定法についてはこれまで検討してこなかった経緯がある。わずかに重回帰分析に着目した推定法 ^{4), 5)} において, 複数の説明変数の一つとして 28 日の質量変化率を適用するに留まっていたのが現状である。乾燥収縮に伴う質量変化は, その測定が供試体を秤に載せるだけのものであり, 至って簡便であることから, 誤差が生じにくい要因であるといえる。この質量変化という要因を用いることで乾燥収縮率との高い相関関係が得られ, 比較的精度の高い推定法が得られるのではないかと考え, 検討を進めることにした。

第一段階では, 質量変化の指標の適切な表し方について検討し, 17 例のコンクリートを用い 10 日から 91 日までの 8 期間の質量変化から 182 日の質量変化を推定できるように関係式を作成した。第二段階では, 10 日から 91 日までの質量変化と乾燥収縮率の関係から, 二次・三次・四次の複数の回帰式を作成し, 採用できる回帰式について検討した。第三段階では, 第一段階で作成した関係式

を用いて 91 日までの質量変化から 182 日の質量変化を推定し, 推定した質量変化を採用した回帰式に適用することで比較的精度の高い乾燥収縮率が推定できないか検討した。

第四段階では, 検討した推定法の検証作業を行なった。14 例のコンクリートを新たに用い, 第一段階から第三段階までの作業を同様に行って比較的精度の高い乾燥収縮率が推定できるか検討した。検討の結果得られた 182 日の推定乾燥収縮率は, 双曲線回帰式に適用することで収束傾向を示し, 364 日迄の乾燥収縮率を推定できることについても明らかにした。

2. 実験の概要

2.1 骨材の物性およびコンクリートの配合

一連の質量変化に着目した推定法の検討で用いたのは, 復興現場である岩手県沿岸地区の 17 工場から実際に出荷されているコンクリートである。コンクリートに用いられた代表的物性として, 絶乾密度および吸水率を表-1 に示す。岩手県沿岸地区では, 砂を単独で使用あるいは他の砕砂と併用している工場が 13 工場にのぼる。砕砂では, 石灰岩あるいは硬質石灰岩を用いている工場が比較的多く 6 工場ある。これ以外の石質としては輝緑岩, 砂岩あるいは硬質砂岩, 粘板岩, 安山岩が使われており, その他の石質としてまとめた。粗骨材でも, 砂利を単独で使用あるいは他の砕石と併用している工場が 9 工場ある。砕石では, 石灰岩あるいは硬質石灰岩を用いている工場が比較的多く, 9 工場ある。これ以外の石質としては輝緑岩, 砂岩, 粘板岩, 安山岩が使われており, その他の石質としてまとめた。

17 例のコンクリートの配合を表-2 に示す。コンクリ

*1 岩手県生コンクリート工業組合 中央技術センター 博士(工学) (正会員)

*2 岩手大学 工学部社会環境工学科准教授 博士(工学) (正会員)

*3 花北生コン株式会社 (正会員)

*4 松村建設株式会社 大槌生コン工場

表-1 17例のコンクリートに用いられた骨材の代表的物性

種類(石質)	産地	使用工場	絶乾密度(g/cm ³)			吸水率(%)				
			最大	最小	平均	最大	最小	平均		
細骨材	砂		11	13	2.64	2.50	2.55	3.03	1.31	1.98
	砕砂	(硬質)石灰岩	2	6	2.65	2.61	2.64	1.37	0.68	1.03
		その他	6	7	2.76	2.59	2.66	2.32	0.97	1.30
粗骨材	砂利		7	9	2.64	2.57	2.60	1.89	1.11	1.37
	砕石	(硬質)石灰岩	3	9	2.70	2.68	2.69	0.83	0.35	0.52
		その他	4	4	2.85	2.60	2.71	1.95	0.67	1.12

表-2 17例のコンクリートの配合

項目	粗骨材の最大寸法(mm)	スランブ(cm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)			
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G
最大値	25	18	49.0	52.3	186	435	941	1064
最小値	20	18	42.0	38.9	168	353	648	866
平均値	—	—	45.3	43.8	177	392	755	987
標準偏差	—	—	2.6	3.9	5.5	27.4	90.8	51.0
変動係数	—	—	5.7	9.0	3.1	7.0	12.0	5.2

ートの種類は、JASS5 の計画供用期間としておよそ 100 年の長期を対象とした呼び強度 30、スランブ 18cm、粗骨材の最大寸法 20mm あるいは 25mm、普通ポルトランドセメントの使用を標準とした。粗骨材の最大寸法 20mm を用いたのは 8 例、25mm を用いたのは 9 例ある。単位水量の範囲は 168~186kg/m³ と比較的大きい。最小値 168kg/m³ のコンクリートには、砂および砂利が使われており、水セメント比は 42.0% と最も小さい。単位水量の最大値 186kg/m³ のコンクリートには、砂と砕砂および砕石が用いられており、水セメント比は 44.0% である。

2.2 供試体の作製および乾燥収縮率の測定

乾燥収縮試験に用いる供試体は 10×10×40cm の角柱供試体 3 本とし、個々の生コン工場で作製した。供試体は翌日、乾燥しないように型枠に入れたままとし、仕上面についても外気に晒されないように保護しながら、乾燥収縮試験を行う岩手工組・中央技術センター(盛岡市)に搬入した。直ちに脱型後、試験開始材齢の 7 日まで 20±2℃ の水槽で水中養生した後、文献⁷⁾で示したように JIS A 1129-3 に示されるダイヤルゲージ方法を用いて乾燥収縮率の測定を行った。

測定室の環境条件は、JIS に則り温度 20±2℃、相対湿度 60±5% を標準とした。ただし、質量変化を用いる推定法は、温度および相対湿度の管理が推定結果に影響を及ぼすことが想定されることから、文献⁷⁾で示したように管理範囲については標準よりも厳しく設定し、15 秒間隔で測定した温度および相対湿度を 1 日毎に評価した。

3. 乾燥収縮率の推定結果および考察

3.1 質量変化の指標

精度の高い推定法を開発するには、乾燥収縮に伴うコンクリートの質量変化として、どのような指標を用いるかが重要である。一般には、質量変化を示す指標として

式(1)を用いる質量変化率が用いられる。同一材料および同一配合のコンクリートを複数作製し、複数の測定場所で質量変化率という指標を用いることは適切である。ただし、本研究のように 17 例の多様な骨材密度および配合を用いたコンクリートの質量変化を質量変化率で表すと、後述する式(1)の基長を測定した時の供試体質量がおのずと異なる。分子の質量変化が同じでも、使用骨材の密度が大きく供試体質量が大きくなるコンクリートの質量変化率は小さくなり、使用骨材の密度が小さく供試体質量が小さくなるコンクリートの質量変化率は大きくなる傾向にあり、乾燥収縮率の推定精度を高めるうえで質量変化率という指標を用いるには問題があると言える。

そこで本研究では、分母の供試体質量を使用骨材の密度の影響を受けない供試体体積に置き換え、質量変化の指標として質量損失量を用いることにした。17 例から得られる質量変化の結果をベースに、17 例とは異なる骨材密度および配合を用いた多様なコンクリートの乾燥収縮率の推定精度を高めるためにも、骨材密度の影響を受けない質量損失量を用いることに意義はあると考えている。

式(2)に質量損失量の計算式を示す。質量損失量の分母は、10×10×40cm の供試体の体積 4 リットルを 1m³ に換算しているために、コンクリートに用いられている骨材の密度や配合の影響を受けず、質量損失量は相対的な比較が容易である。乾燥収縮に伴う質量損失の程度を 1m³ 当たりで換算することで、配合上の単位水量と比較できるとともに、182 日後の一般的なコンクリートの質量損失の程度が物理的に理解しやすくなるという長所もある。

$$M_1 = \frac{M_i - M_0}{M_0} \quad (1)$$

ここに、 M_1 : 質量変化率 (%), M_i : それぞれの乾燥期間の供試体質量 (kg), M_0 : 基長を測定した時の供試体質量 (kg)

$$M_2 = (M_0 - M_i) \times \frac{1000}{4} \quad (2)$$

ここに、 M_2 : 質量損失量 (kg/m³),

3.2 91 日迄の質量損失量と 182 日の質量損失量の関係

182 日以前の質量損失量から 182 日の乾燥収縮率を推定するためには、182 日以前の乾燥期間の質量損失量と 182 日の質量損失量との関係を個々に求めておくことが必要になる。本研究では、182 日以前の質量損失量を 10 日から 91 日までの 8 期間とし、それぞれの期間の質量損失量と 182 日の質量損失量の関係式を求めることにした。一例として、10 日の質量損失量と 182 日の質量損失量の関係を図-1 に、91 日の質量損失量と 182 日の質量損失量の関係を図-2 に示す。

10 日の質量損失量に着目した関係式に比べて 91 日の質量損失量に着目した関係式の方が R² (寄与率) は大きく、関係式の傾きが 45° の参考線に近づく傾向を示している。10 日に比べて 91 日の質量損失量を用いた方が、182 日の質量損失量を精度よく推定できる可能性を示唆している。一連の検討の結果得られた 10 日から 91 日迄の質量損失量と 182 日の質量損失量との関係式を、表-3 に示す。ここでは 91 日以降の測定期間である 119 日にも着目して関係式を求め、今後検討していく乾燥収縮率の推定の比較対照とした。乾燥期間が 10 日から 91 日と長くなるにつれて 182 日との相関は良好になることが容易に想定されるが、良好の程度を一次関係式 (Y=b+aX) および寄与率 (R²) で具体的に示すことにした。乾燥期間が長くなるにつれて切片 b は 0 に近づき、傾き a は 1 に徐々に近づくとともに、寄与率 (R²) も相関の程度が徐々に良好になり 1 に近似することが具体的に見てとれる。

3.3 推定に用いる回帰式の検討

表-3 に示した関係式を用い、182 日以前の質量損失量から 182 日の質量損失量を推定し、さらに 182 日の乾燥収縮率を精度よく推定するためには、質量損失量と乾燥収縮率の関係から精度の高い回帰式を求める必要がある。そこで第二段階では、10 日から 91 日までの質量損失量と乾燥収縮率の関係から、二次回帰式、三次回帰式および四次回帰式を求め、精度よく乾燥収縮率を推定できる回帰式を特定することにした。回帰式の次数を整数にしたのは、より簡便な回帰式にすることで、乾燥収縮率を簡易的に推定できるように考慮したためである。

10 日までの質量損失量と乾燥収縮率の関係から、二次回帰式を求める作業を行ない、同様の作業を 91 日までの 8 期間に着目して行った結果の一例を、図-3 に示す。回帰に用いた質量損失量は、着目したすべての乾燥期間の質量損失量を対象としている。10 日であれば 0 日から 1 日、3 日、5 日、7 日および 10 日までの質量損失量であ

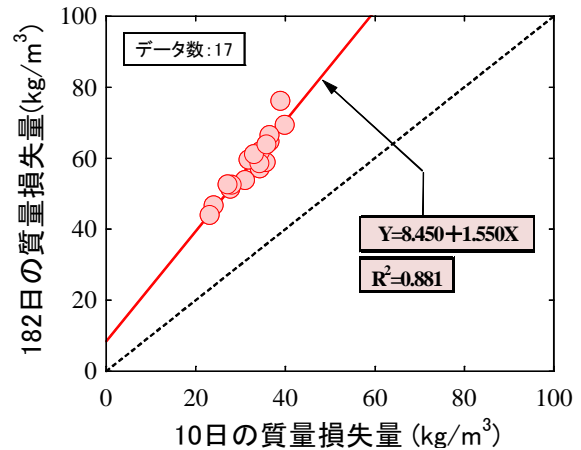


図-1 10 日の質量損失量と 182 日の質量損失量の関係

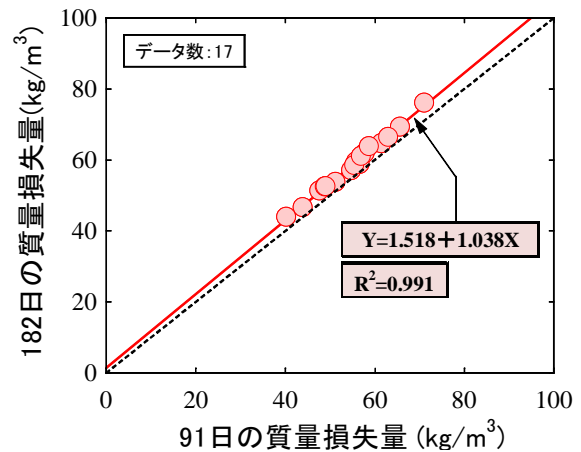


図-2 91 日の質量損失量と 182 日の質量損失量の関係

表-3 10 日から 91 日迄の質量損失量と 182 日の質量損失量の関係式

期間 (日)	関係式	R ²
10	Y=8.450 + 1.550X	0.881
14	Y=7.639 + 1.393X	0.926
21	Y=6.900 + 1.252X	0.956
28	Y=6.217 + 1.179X	0.970
42	Y=5.039 + 1.103X	0.981
56	Y=3.780 + 1.071X	0.986
70	Y=2.407 + 1.058X	0.989
91	Y=1.518 + 1.038X	0.991
119	Y=0.9441 + 1.022X	0.996

る。図-3 には複数のラインを示しているが、右上がり勾配が最も大きくなるのは、乾燥期間 91 日を対象とした場合であり、182 日の実際の質量損失量に対する乾燥収縮率と近似する傾向を示している。

同様に三次回帰式を求めた結果の一例を図-4 に、四

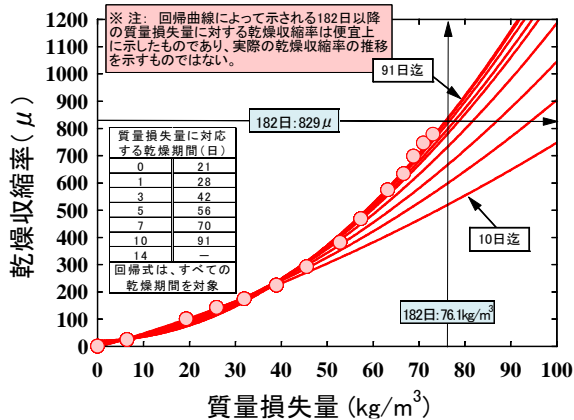


図-3 質量損失量と乾燥収縮率の関係から二次回帰式を求めた一例

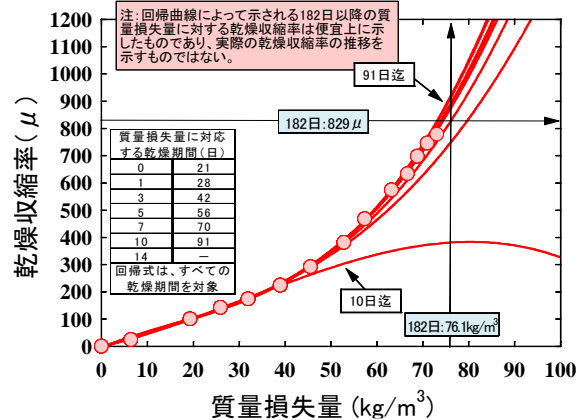


図-4 質量損失量と乾燥収縮率の関係から三次回帰式を求めた一例

次回帰式を求めた一例を図-5に示す。3種類の図には、182日に測定された実際の質量損失量と乾燥収縮率を参考までに示し、推定される182日の質量損失量から182日の乾燥収縮率を推定できるかの検討材料とした。図に注釈したように、回帰曲線によって示される182日以降の質量損失量に対する乾燥収縮率は便宜上に表示したものであり、実際の乾燥収縮率の推移を示すものではないことに注意が必要である。

3種類の図を比較すると、二次回帰式によって乾燥収縮率を精度よく推定できる乾燥期間がある。三次回帰式を使用する場合にも精度よく乾燥収縮率を推定できる乾燥期間があるものの、右下がりのグラフがあり推定乾燥収縮率が極端に小さくなる恐れもある。四次回帰式を適用した場合には、右上がりの勾配が大きくなり、推定乾燥収縮率が実測乾燥収縮率に比べて大きくなる傾向がある。

検討をさらに進めた結果、二次回帰式を用いた場合には91日の質量損失量から182日の乾燥収縮率を精度よく推定できる可能性があることが明らかとなった。材料および配合が異なるコンクリートでは回帰式がおのずと異なることが容易に想定され、今後依頼される乾燥収縮率の推定に回帰式を適用することはできない。ただし、その都度得られる回帰式を用いて、現場環境下のコンクリートの乾燥収縮率を推定できる可能性を秘めているのではないかと考えている。具体的には、乾燥収縮試験用のコンクリート供試体を6本作製し、3本については温度および相対湿度を管理して質量変化と乾燥収縮率を測定して回帰式を求める。残りの3本の供試体についてはコンクリートの打込み現場などに設置して同じように質量の変化を測定し、温度および相対湿度を管理して得られる回帰式を適用できれば、現場環境下での乾燥収縮率を推定できることになる。ただし、この実現のためには、温度および相対湿度を管理して得られる回帰式と現場環境下で得られる回帰式が同一になることを確認すること

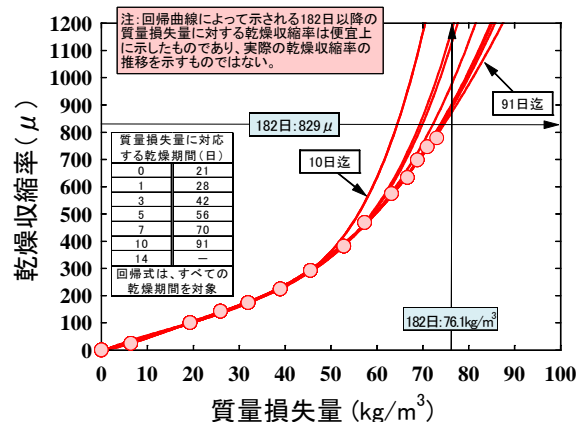


図-5 質量損失量と乾燥収縮率の関係から四次回帰式を求めた一例

が必要である。

三次回帰式を用いる場合には精度よく推定できる乾燥期間を特定することが難しく、四次回帰式の場合には推定乾燥収縮率が二次回帰式に比べて大きくなる傾向が見られたため、二次回帰式を用いる検討をさらに進めていくこととした。二次回帰式に適用する乾燥期間によって推定質量損失量がどのように推移し、推定乾燥収縮率がどのように変化していくのか、その過程を10日と91日迄のデータに着目して示したのが図-6である。182日の実測質量損失量は76.1kg/m³、実測乾燥収縮率は829 μである。これに対し、10日から推定される質量損失量は68.8kg/m³であり、これを二次回帰式に適用することで182日の推定乾燥収縮率は455 μとなり、精度に劣る結果を示している。同様に、91日から推定される質量損失量は75.2kg/m³と実際の質量損失量に近似しており、これを二次回帰式に適用することで182日の推定乾燥収縮率は810 μとなり精度の向上が見られる。

同様の作業を17例のコンクリートに適用し、推定乾燥収縮率と実測乾燥収縮率との差を最大値や最小値などの

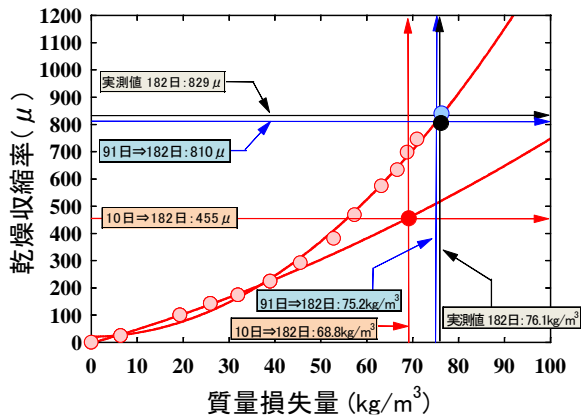


図-6 推定した質量損失量を二次回帰式に適用して求めた推定乾燥収縮率の一例

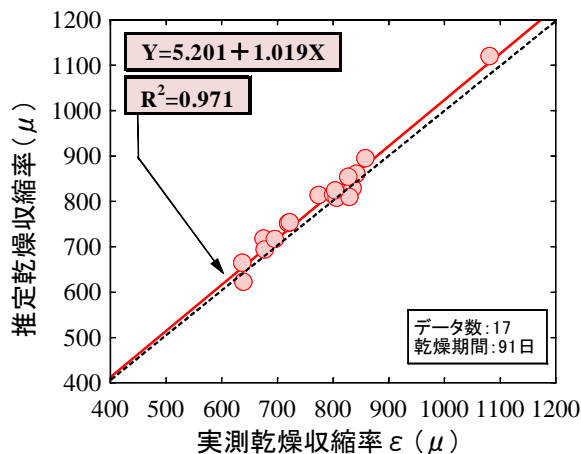


図-7 17例の実測乾燥収縮率と91日から推定した乾燥収縮率の関係

統計値に着目して示したのが表-4である。これらの統計値を示すことで、実用的にコンクリートの乾燥収縮率を推定する際の推定精度を把握することができると考えている。これによると、91日の標準偏差が19μと最も小さく、119日の15μとほぼ同等の結果を示しており、推定精度の高いことが伺える。

17例のコンクリートの実測乾燥収縮率と91日から推定した乾燥収縮率の関係を、図-7に示した。R²(寄与率)は1に近く、高い相関を示していることから、91日の質量損失量から182日の質量損失量を推定し、この結果を二次回帰式に適用することで、得られる推定乾燥収縮率は実際の乾燥収縮率に近似することが明らかとなった。

3.4 14例のコンクリートを用いた検証作業

一連の検討によって得られた結果が適切なものか判断するために、17例とは異なる14例のコンクリートを用い、17例と同様の検証作業を行なった。コンクリートの乾燥期間中の温湿度条件については、17例の場合と同様に管理している。コンクリートの種類は17例と同様に

表-4 17例のコンクリートを対象とした推定乾燥収縮率と実測乾燥収縮率の差の統計値

期間(日)	推定乾燥収縮率-実測乾燥収縮率(μ)			
	最大値	最小値	平均値	標準偏差
10	-47	-374	-182	102
14	22	-290	-102	86
21	61	-208	-37	72
28	70	-137	-2	57
42	67	-77	16	41
56	61	-52	21	34
70	51	-31	21	25
91	43	-19	20	19
119	42	-7	18	15

表-5 14例のコンクリートを対象とした推定乾燥収縮率と実測乾燥収縮率の差の統計値

期間(日)	推定乾燥収縮率-実測乾燥収縮率(μ)			
	最大値	最小値	平均値	標準偏差
10	-79	-468	-299	117
14	-40	-333	-212	95
21	21	-228	-129	75
28	48	-147	-78	57
42	60	-86	-35	39
56	60	-68	-15	29
70	56	-50	-5	23
91	46	-35	0	18
119	46	-26	13	21

呼び強度30、スランプ18cm、粗骨材の最大寸法20mmあるいは25mm、普通ポルトランドセメントの使用を標準とした。単位水量は172~184kg/m³、水セメント比は45.5~53.0%の範囲にある。

推定乾燥収縮率と実測乾燥収縮率との差を最大値や最小値などの統計値に着目して示したのが表-5である。17例と同様に91日の標準偏差が最も小さく、119日の標準偏差を下回る結果を示した。14例の実測乾燥収縮率と推定乾燥収縮率の関係を図-8に示したところ、両者は高い相関を示すことも明らかとなった。

91日の実測乾燥収縮率と182日の推定乾燥収縮率を双曲線回帰式⁷⁾に適用し、362日までの推定乾燥収縮率の推移を示した一例が、図-9である。182日の推定乾燥収縮率が実測乾燥収縮率よりも小さく、182日以降の推定値と実測値が乖離する傾向を示している。182日における推定乾燥収縮率は、両者の差が19μと比較的小さいことから有用性を有していると考えられるが、182日以降の推定値については182日の推定結果を踏まえ、両者の差が乖離する傾向を示す恐れがあることを踏まえておく必要がある。

乾燥収縮率の推定法は、28日程度の短期間に、しかも精度よくの両面を有しているのが望ましい。本推定法は、

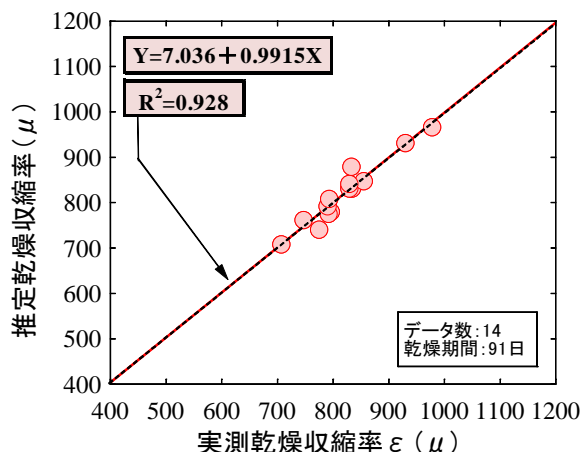


図-8 14例の実測乾燥収縮率と
91日から推定した乾燥収縮率の関係

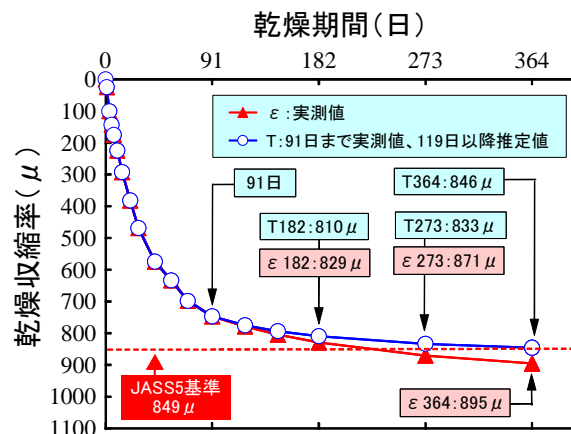


図-9 双曲線回帰式によって求めた
推定乾燥収縮率の推移の一例

91日と比較的長い乾燥期間を用いていることから、短期間という有用性には劣る。ただし、乾燥期間が長い分182日に近く、測定誤差の生じにくい質量変化から推定値を求めていることから182日の推定精度は比較的高く、精度の面では有用性があると考えている。

さらに、本推定法は温度および相対湿度の管理範囲を通常のJISよりも厳しく設定しているが、このような管理をせず、通常のJISの範囲内で偏りのない管理をすることにより、本推定法の適用は可能であると考えている。ただし、温度および相対湿度がJISの範囲内でも乾燥期間の推移に伴って上限あるいは下限に偏る傾向がある場合には、得られる回帰式は厳密に管理された回帰式とは異なり、推定乾燥収縮率と実測乾燥収縮率の間には乖離が生じる恐れがあると言える。

4. まとめ

17例のコンクリートを用い、質量損失量から推定乾燥収縮率を求め、14例のコンクリートを用いた検証作業の結果、明らかになった点は次のとおりである。

- (1) 17例の91日の質量損失量と182日の質量損失量は高い相関があり、この関係式を用いる182日の推定質量損失量は実際の質量損失量に近似する。
- (2) 91日の質量損失量と乾燥収縮率の関係から二次回帰式を求め、この回帰式に182日の推定質量損失量を適用することで、実際の乾燥収縮率に近似する推定乾燥収縮率が、17例のコンクリートで得られた。
- (3) 同様の作業を14例のコンクリートでも行った結果、実際の乾燥収縮率に近似する推定乾燥収縮率が得られた。
- (4) 91日の実測乾燥収縮率と182日の推定乾燥収縮率を双曲線回帰式に適用することで、364日迄の収束傾向を示す推定乾燥収縮率が得られる。

なお、本研究は岩手工組に設置されているワーキンググループが行ったものであり、連名者以外のメンバーは次のとおりである。田上正義(盛岡小野田レミコン(株)), 浅沼秀臣(東北化学工業(株)), 石ヶ森勝美(紫波カイハツ生コンクリート(株)), 山内茂樹(岩手工組・県南技術センター)

参考文献

- 1) 社団法人日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事，2009.2
- 2) 袴田豊ほか：双曲線を用いたコンクリートの乾燥収縮率の早期推定法に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp.478-483，2012.7
- 3) 高橋潤吉ほか：乾燥材齢1～4週の実測乾燥収縮率を双曲線に適用したコンクリートの乾燥収縮率の早期推定法，第17回生コン技術大会研究発表論文集，pp.215-220，2013.4
- 4) 袴田豊ほか：双曲線の推定式と重回帰分析を組み合わせたコンクリートの乾燥収縮率の早期推定法に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.559-564，2013.7
- 5) 袴田豊ほか：コンクリートの乾燥収縮率の推定法改善に関する解析的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，pp.496-501，2014.7
- 6) 袴田豊ほか：二次回帰式および四次回帰式を用いたコンクリートの乾燥収縮率の推定法，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.379-384，2015.7
- 7) 袴田豊ほか：四次回帰式および双曲線回帰式を併用した200年までのコンクリートの推定乾燥収縮率，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp.501-506，2016.7