

論文 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

袴田 豊^{*1}・小山田 哲也^{*2}・山内 茂樹^{*3}・作間 晋吾^{*3}

要旨：91 日までの実測乾燥収縮率を四次回帰式に適用することで、実測乾燥収縮率に比べてプラス側、すなわち安全側となる推定乾燥収縮率が得られることを明らかにしている。ただし、収束値に近づかない四次回帰式を用いているため、乾燥期間 182 日以降の推定乾燥収縮率が実測乾燥収縮率と大きく乖離する問題点を抱えていた。そこで本研究では、182 日の推定乾燥収縮率は四次回帰式で安全側に求め、これ以外の 200 年までの推定乾燥収縮率については双曲線回帰式によって求めることで、収束値に近づく推定式となり、しかも得られる推定乾燥収縮率は双曲線回帰式を単独で用いる場合に比べて比較的大きくなることを明らかにした。

キーワード：四次回帰式、双曲線回帰式、200 年、乾燥収縮率、推定、安全側

1. はじめに

建築工事標準仕様書・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、これまでさまざまな方法を用いている。

推定法の第一段階で着目したのは、双曲線回帰式を用いる方法である^{2), 3)}。乾燥期間 14 日および 28 日の実測乾燥収縮率を双曲線回帰式に適用することで、182 日までのすべての乾燥期間の推定乾燥収縮率が求められる推定法を開発している。その後、推定精度を高めるために、重回帰分析に着目した推定法^{4), 5)}についても開発している。ただし、推定精度は向上できたものの、重回帰分析に用いた乾燥期間 28 日、42 日および 56 日の実測乾燥収縮率は、互いに近接しているため相関が高く、推定乾燥収縮率が実測乾燥収縮率とは異なる恐れのある多重共線性の懸念を抱えていた。さらに、得られた推定乾燥収縮率の多くが実測乾燥収縮率に比べて小さく、危険側の領域にあることも明らかとなった。

これを改善する方法として着目したのが、二次回帰式および四次回帰式を用いる推定法⁶⁾である。二次回帰式については推定精度の高い乾燥期間を特定することができず、実用には適さないことが明らかとなった。ただし四次回帰式については、56 日、70 日あるいは 91 日までの実測乾燥収縮率を適用することで、精度が高く、実測乾燥収縮率に比べてプラス側、すなわち安全側となる推定乾燥収縮率が多く得られることを明らかにしている。

コンクリート用語辞典⁷⁾によると、コンクリートを飽水した状態から乾燥させると、最終的な収縮ひずみは 1000×10^{-6} 以上にも達すると明記されており、乾燥収縮

には最終的な収束値が存在することを明らかにしている。ところが、収束値に近づかない四次回帰式を用いているため、182 日以降の推定乾燥収縮率については実測乾燥収縮率と比べると大きくなり過ぎ、両者は乖離する傾向を示す問題点が指摘されていた。本研究では、この点を改善し、182 日以降 200 年までの推定にも適用できるように、四次回帰式および収束値に近づく双曲線回帰式を併用する推定法について検討した。

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

四次回帰式および双曲線回帰式を併用する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骨材の代表的物性として、絶乾密度および吸水率を表-1 に示す。細骨材では、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、その他の石質には輝緑岩、砂岩あるいは硬質砂岩、粘板岩、安山岩が含まれる。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多く、その他の石質として輝緑岩、砂岩、粘板岩、安山岩が使われている。

17 例のコンクリートの配合を表-2 に示す。コンクリートの種類は、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。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 $168 \sim 186 \text{kg/m}^3$ と比較的大きい。最小値 168kg/m^3 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。一方、最

*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 岩手県生コンクリート工業組合 県南技術センター

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

大値186kg/m³のコンクリートの水セメント比は44.0%であり、水セメント比の最大値49.0%とは一致しない。一般に、単位セメント量が多くなるほど自己収縮ひずみも大きくなる傾向がある。本研究では、単位セメント量が353~435kg/m³と比較的多く、測定された乾燥収縮率には自己収縮ひずみが含まれている可能性が高い。

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。その際、型枠にコンクリートを詰めてからブリーディングの処理が終わるまでの作製時間も報告してもらった。作製時間の最小値、最大値、平均値は順に1時間30分、7時間27分、4時間31分である。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)に搬入してもらった。

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、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開始した。写真-1は、目量0.001mmのダイヤルゲージを用いた縦型測定器による測定の模様である。基長は材齢7日で測定し、翌日の1日から乾燥収縮率の測定を開始した。3日、5日と初期の測定を行い、28日までは8期間、42日以降は56日、70日および91日と続け、26週の182日までは7期間で実施した。さらに、本研究では収束値に近づく推定式の検討を行うために39週の273日、および52週の364日も対象に加え、合わせて17期間で乾燥収縮率の測定を実施した。17例の乾燥収縮率の測定は、2014年9月16日から開始し、2015年12月2日に終了している。

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、四次回帰式を用いる推定法は、温度および相対湿度の管理が推定結果に影響



写真-1 縦型測定器による乾燥収縮率の測定

を及ぼすことが想定されることから、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。温度は管理範囲を3種類に区分し、①1日のすべての温度が20±2.0℃以内にあることに加え、②20.0±0.5℃の温度が1日のデータ数の50.0%以上を占めること、③20.0±1.0℃の温度が1日のデータ数の80.0%以上を占め、平均値がこの範囲にあることを独自の管理基準とした。一方、相対湿度は管理範囲を2種類に区分し、①1日のすべての相対湿度が60±5%以内にあることに加え、②60±3%の相対湿度が1日のデータ数の50.0%以上を占め、平均値がこの範囲にあることを独自の管理基準とした。それぞれの管理基準を満足しているか否かは、乾燥収縮率測定中の温度上昇も含めて評価した。一例として図-1に、測定期間中の2014年11月2日に管理して測定した温度の推移を、図-2に、同日の相対湿度の推移を示した。

3. 乾燥収縮率の推定結果および考察

3.1 四次回帰式を用いた推定乾燥収縮率

図-3に、乾燥期間364日まで測定を続けた17例のこ

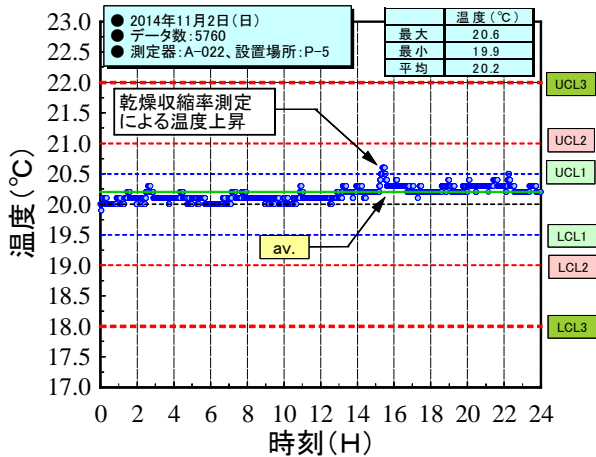


図-1 管理した温度の推移の一例

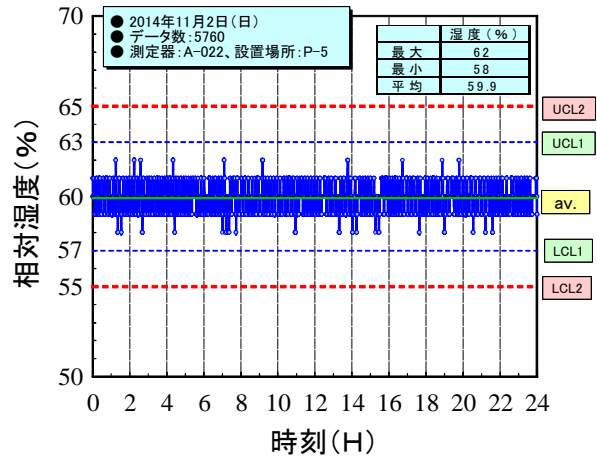


図-2 管理した相対湿度の推移の一例

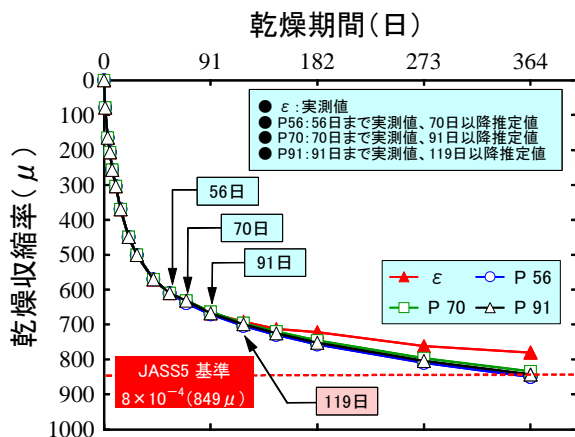


図-3 364日までの四次回帰式を用いた推定乾燥収縮率Pの推移の一例

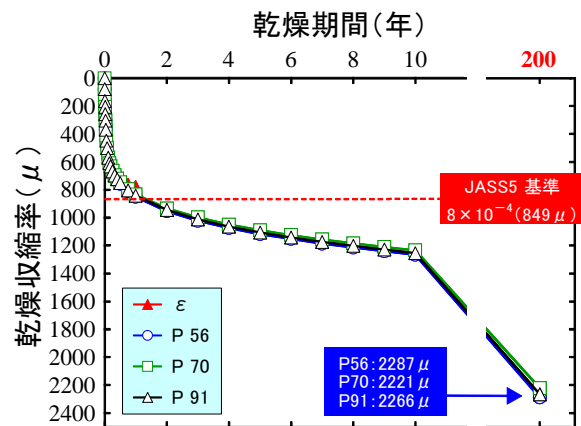


図-4 200年までの四次回帰式を用いた推定乾燥収縮率Pの推移の一例

ンクリートのうち1例を選び、四次回帰式を適用した推定乾燥収縮率の推移を示す。実測乾燥収縮率 ϵ が182日以降徐々に収束する傾向を示しているのに対して、5日から56日までの実測乾燥収縮率を四次回帰式に適用して求めた推定乾燥収縮率P56は収束する傾向を示しておらず、両者の差は徐々に開きつつある。5日から70日までの実測乾燥収縮率を四次回帰式に適用して推定したP70、5日から91日までの実測乾燥収縮率を四次回帰式に適用して推定したP91についても同様の傾向を示している。

乾燥期間が長期に及んだ場合の推定乾燥収縮率の推移を見るために、乾燥期間をJASS5の超長期の計画供用期間に相当する200年まで延長した場合の推定乾燥収縮率を求め、その結果を図-4に示した。P56、P70およびP91いずれも収束する傾向は一切見られず、乾燥期間が200年になると、推定乾燥収縮率はいずれも2000 μ を超える結果が得られた。参考文献⁹⁾で指摘した「通常の指数関数や双曲線などの収束値に近づく関数とは異なり、

収束値に近づかない四次回帰式を用いているため、182日以降の推定乾燥収縮率が実測乾燥収縮率と大きく乖離することは明白である。182日以降の乾燥収縮率は測定していないが、四次回帰式の適用はあくまでも182日の乾燥収縮率を安全側に推定するためのもので、182日以降の推定には適さないことに留意することが必要である。」とのコメントを実際に確認することができた。200年までの長期にわたる乾燥収縮率を四次回帰式で推定するには無理があり、新たな推定法の検討が必要である。

3.2 四次回帰式および双曲線回帰式を併用した推定法の検討

収束値に近づく推定式として着目したのは、文献²⁾で採用した双曲線回帰式である。双曲線は、直角双曲線といわれる反比例のグラフ($y = a/x$, a は正の定数)を一つの例とする図-5のような形の曲線である。中心に対し点対称な二つの無限に伸びた曲線からなり、中心から離れるほど2つの漸近線(X軸、Y軸)に限りなく近づいていく性質を持つ。その2つの曲線のうちの片方

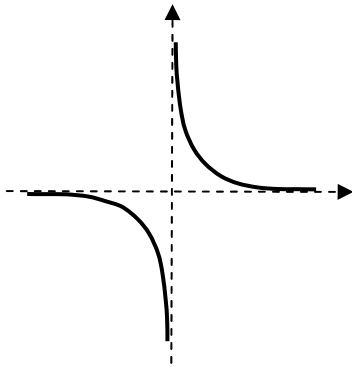


図-5 双曲線の一例

だけでも双曲線ということから、本研究でも直角双曲線として一般的な式(1)を推定式として用いることにした。

$$S = \frac{t}{(at+b)} \quad (1)$$

ここに、 S ：推定乾燥収縮率(μ)

a および b ：係数

t ：乾燥期間(日)

式(2)では、漸近線が $t = -\frac{b}{a}$, $S = \frac{1}{a}$ で、中心が

$(-\frac{b}{a}, \frac{1}{a})$ の直角双曲線となる。

推定乾燥収縮率 S の算出に当たっては、最小二乗法が適用しやすいように、式(1)を式(2)の形に修正して求めた。

$$y = a + bx \quad (2)$$

ここに、 $y = 1/S$, $x = 1/t$

推定乾燥収縮率は、式(1)の係数 a および b によっておのずと異なる。二つの係数は、事前に設定する乾燥期間の組合せによっても異なり、これが延いては推定乾燥収縮率に影響を及ぼすことが明らかとなっている。これまでの研究から、5日から56日、5日から70日および5日から91日までの実測乾燥収縮率を四次回帰式に適用して得られる3種類の推定乾燥収縮率のうち、最も大きい推定乾燥収縮率は実測乾燥収縮率に比べて大きく、安全側になることが明らかとなっている。そこで、182日の推定乾燥収縮率は四次回帰式によって求め、この推定乾燥収縮率と56日、70日および91日の実測乾燥収縮率をそれぞれ組み合わせると係数 a および b を求め、所定の乾燥期間と併せ双曲線回帰式(1)に適用することで推定乾燥収縮率が求められる。3種類の推定乾燥収縮率のいずれかは実測乾燥収縮率と比べて大きく安全側となり、

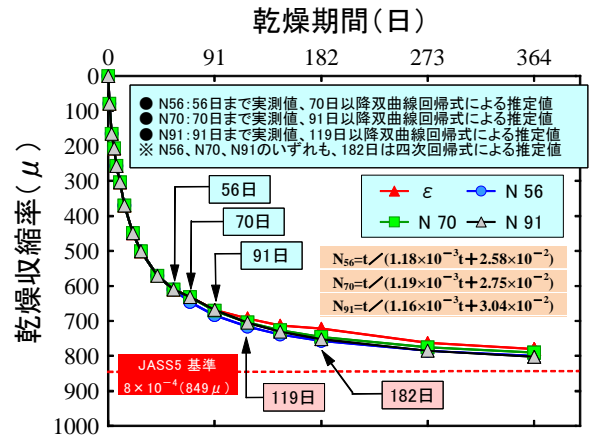


図-6 四次回帰式と双曲線回帰式を併用して求めた推定乾燥収縮率 N の推移の一例

収束値に近づく推定乾燥収縮率になるものと考えられた。

そこで、17例のすべてのコンクリートを対象として同様の作業を行い、3種類の推定乾燥収縮率を求めることにした。56日と182日、70日と182日、および91日と182日の乾燥収縮率の組合せから得られる推定乾燥収縮率を、 N_{56} , N_{70} および N_{91} と表すこととする。図-3で採用した実測乾燥収縮率を再び用い、364日までに得られた推定乾燥収縮率 N_{56} , N_{70} および N_{91} の推移を、図-6に示した。ここで示した双曲線回帰式は、 N_{56} が56日以降の乾燥期間を、 N_{70} が70日以降の乾燥期間を、 N_{91} が91日以降の乾燥期間を対象としており、双曲線回帰式は対象となる期間を連続的に表している。182日以降の推定乾燥収縮率の推移が図-3とは異なり、実測乾燥収縮率と近似し、収束値に近づく傾向を示している。

図-3で用いた推定乾燥収縮率 P と図-6で用いた推定乾燥収縮率 N を、91日から364日までの乾燥期間を対象として対比したのが、図-7である。図の中では、364日の実測乾燥収縮率 ϵ と推定乾燥収縮率 P の最大値および推定乾燥収縮率 N の最大値との差も表している。182日以降、3種類の推定乾燥収縮率 N は実測乾燥収縮率と近似し、しかも最大で 20μ 程度プラス側に推移しているのが見て取れる。一方、推定乾燥収縮率 P に着目すると実測乾燥収縮率との差は最大で 70μ となっており、プラス側では推移しているものの、その差は推定乾燥収縮率 N に比べて大きく、推定精度に劣る傾向にある。

17例のコンクリートの364日の実測乾燥収縮率と、推定乾燥収縮率 P の最大値および N の最大値を比較したのが、図-8である。推定乾燥収縮率 P および N は、17例いずれも実測乾燥収縮率 ϵ と比べて大きい値を示しているが、推定乾燥収縮率 N の方が P に比べて総体的に ϵ と近似する傾向が見られる。二つの回帰式に着目すると、推定乾燥収縮率 N の切片が P に比べて小さく、17例の

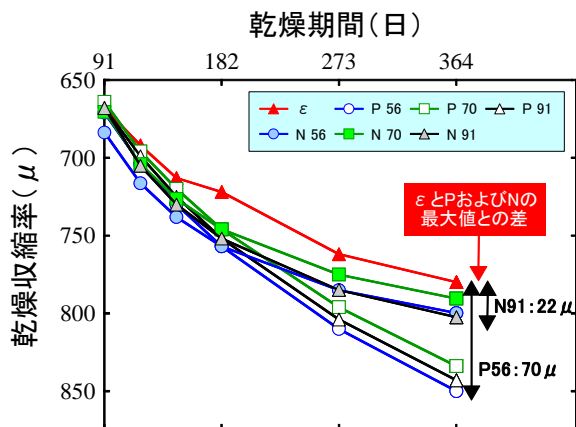


図-7 91日から364日までを対象とした推定乾燥収縮率PおよびNの推移

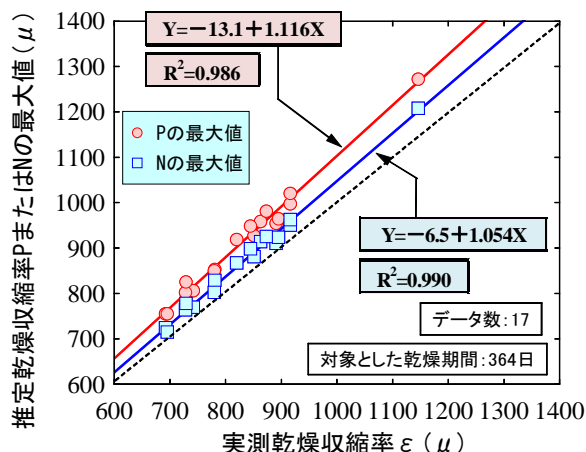


図-8 17例を対象とした364日の実測乾燥収縮率εと推定乾燥収縮率Pの最大値およびNの最大値との比較

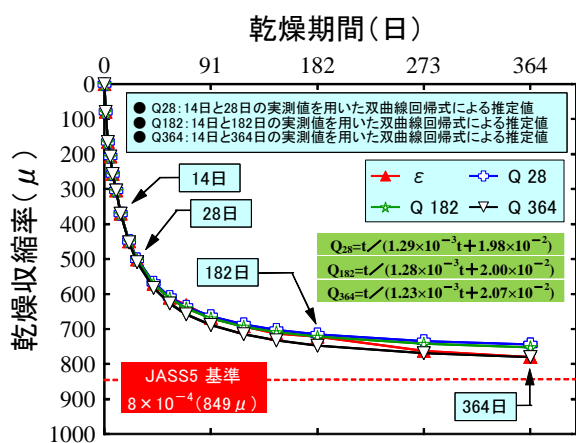


図-9 双曲線回帰式によって求めた推定乾燥収縮率Qの推移の一例

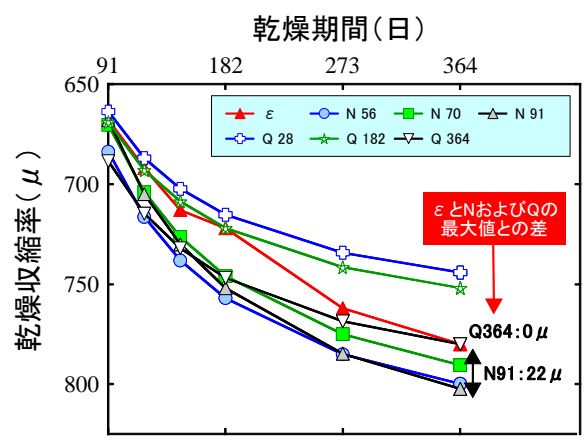


図-10 91日から364日までを対象とした推定乾燥収縮率NおよびQの推移

コンクリートを対象としても推定乾燥収縮率Nの精度の高さが明らかとなった。

乾燥期間364日までの検討を通じ、四次回帰式と双曲線回帰式を併用する推定乾燥収縮率Nは、実測乾燥収縮率に比べて大きく安全側となり、しかも収束値に近づく傾向を示すことが明らかとなった。推定乾燥収縮率は、200年の長期に及ぶ場合にも、比較的大きくなることが望ましい。一方で、双曲線回帰式を適用する場合、事前に設定する乾燥期間の組合せによって二つの係数aおよびbが異なり、これが延いては推定乾燥収縮率に影響を及ぼすことは、前述したとおりである。四次回帰式を用いなくて、二つの実測乾燥収縮率を組み合わせ、双曲線回帰式に適用することで推定乾燥収縮率を求めることも可能である。そこで、参考文献²⁾で着目した乾燥期間14日を起点に28日、182日、および364日の実測乾燥収縮率をそれぞれ組み合わせ、双曲線回帰式に適用し、200年までの推定乾燥収縮率を求め、同期間の推定乾燥収縮

率Nと比較することとした。14日と28日から得られる推定乾燥収縮率をQ28、14日と182日ではQ182、14日と364日の場合にはQ364と表すこととする。

図-3で採用した実測乾燥収縮率を再び用い、364日までに得られた推定乾燥収縮率Q28、Q182およびQ364の推移を、図-9に示した。182日以降の推定乾燥収縮率の推移が図-6で示した推定乾燥収縮率Nと近似しており、収束値に近づく傾向も示している。推定乾燥収縮率NとQを、91日から364日までの乾燥期間に限定して比較したのが、図-10である。図の中では、364日の実測乾燥収縮率εと推定乾燥収縮率Nの最大値との差、および推定乾燥収縮率Qの最大値との差も表している。推定乾燥収縮率NおよびQいずれもεと近似する傾向を示しているが、364日における両者を比較するとNの方が20μ程度大きい。17例のコンクリートで比較してもQが平均で25μ大きいのに対してNは平均で39μ大きく、Nの方が安全側に推定できる傾向を示している。

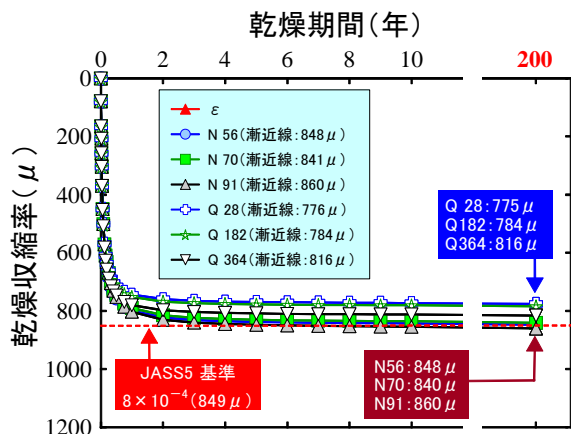


図-11 乾燥期間 200 年までを対象とした
推定乾燥収縮率 N および Q の推移

乾燥期間をさらに 200 年まで延長し、推定乾燥収縮率 N と Q を比較したのが、図-11 である。前述したように、双曲線回帰式を用いると X 軸および Y 軸の漸近線が求められる。Y 軸の漸近線は、乾燥収縮率の収束値に相当することから、図中では推定乾燥収縮率 N および P の漸近線を凡例に示した。推定乾燥収縮率 N および P いずれも、収束値に近づく傾向を示しており、乾燥期間 200 年には漸近線と同等となる。漸近線と同等となる推定乾燥収縮率は、概ね 50 年後に得られることも確認している。200 年の推定乾燥収縮率を比較すると、N の方が Q に比べて大きい推定乾燥収縮率が得られる可能性を示唆している。

17 例のコンクリートを対象として、200 年の推定乾燥収縮率 N の最大値と Q の最大値を比較したのが、図-12 である。No.16 の N の最大値 1002 μ が Q の最大値 1174 μ より小さいものの、これ以外の 16 例についてはいずれも N の方が大きく、四次回帰式と双曲線回帰式を併用する推定乾燥収縮率 N は、双曲線回帰式のみを用いる推定乾燥収縮率 Q に比べ、200 年の長期にわたって大きくなる可能性を示唆することが明らかとなった。

4. まとめ

17 例のコンクリートを用い、四次回帰式および双曲線回帰式を併用する方法で 200 年までの推定乾燥収縮率を求めた結果、明らかになった点は次のとおりである。

- (1) 四次回帰式と双曲線回帰式を併用することで、求められる推定乾燥収縮率は実測乾燥収縮率と同様に収束値に近づく傾向を示す。
- (2) 四次回帰式と双曲線回帰式を併用することで、364 日に求められる推定乾燥収縮率は実測乾燥収縮率と比較して平均で 39 μ 大きく、安全側となる。
- (3) 四次回帰式と双曲線回帰式を併用する推定乾燥収縮率は、双曲線回帰式を単独で用いた推定乾燥収縮率

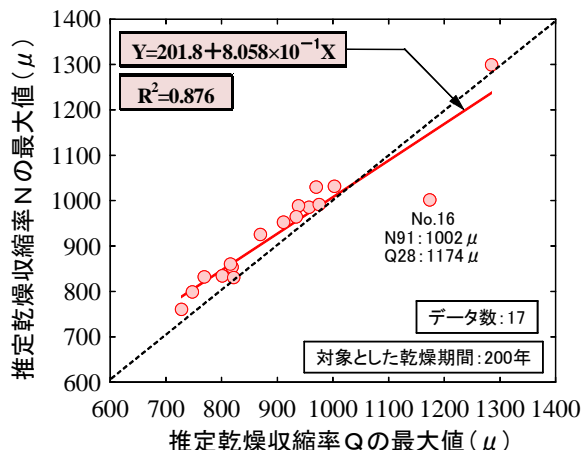


図-12 17 例のコンクリートを対象とした 200 年の
推定乾燥収縮率 N の最大値と Q の最大値の比較

に比べて、200 年の間大きく推移する可能性がある。

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。高橋潤吉(花北生コン(株)), 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)), 浪板克也(松村建設(株))。

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，2009.2.20
- 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) 社団法人日本コンクリート工学協会・コンクリート用語辞典編集委員会編：コンクリート用語辞典，社団法人日本コンクリート工学協会，1983.8.15