

論文 コンクリートの乾燥収縮に対する石灰石骨材の有効性

小山田 哲也^{*1}・小田島 悠弥^{*2}・越谷 信^{*3}・藤原 忠司^{*4}

要旨：13種類の骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮を測定し、コンクリートの乾燥収縮を低減させるひとつの方法として、石灰石骨材の使用が有効であると確認された。しかし、中には比較的大きなコンクリートの乾燥収縮をもたらす石灰石骨材もあり、注意を要する。コンクリートの乾燥収縮を小さくした石灰石骨材の場合、内部に微細な空隙が少なく、内部表面積が小さくなって、骨材自体の収縮が小さい。そのため、コンクリートの収縮を低減させるといえる。骨材自体の収縮のほか、骨材自体のヤング係数も、コンクリートの収縮に関わる。この点については、複合則の観点からの検討によって確認された。

キーワード：乾燥収縮, 石灰石骨材, 内部表面積, ヤング係数, 細孔径分布, 複合則

1. はじめに

コンクリートの乾燥収縮を抑制する方法のひとつとして、石灰石骨材の使用が挙げられ、実際にも、この骨材を用いる例が増えてきている傾向にあると思われる。しかし、石灰石骨材のすべてが収縮抑制に役立つとは限らない可能性もあり、この点を確認しておく必要がある。また、コンクリートの乾燥収縮について、近年数多くの研究が行われ、コンクリートの弾性係数¹⁾あるいは骨材の比表面積²⁾との相関が高い等の報告がある。これらは、現実的には複合的に作用していると考えられるものの、それらの関わりは現段階で明らかになっているとはいえない。

本研究では、石灰石骨材をはじめ、多種類の石質の骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮を測定し、その結果から、石灰石骨材使用の有効性を確認した。その結果をもとに、コンクリートの乾燥収縮に及ぼす骨材の物性の影響を精査し、石灰石骨材を用いた場合にコンクリートの乾燥収縮が小さくなる理由を、明らかにしようとした。

2. 実験概要

2.1 使用材料

使用した骨材は、表-1に示すとおりであり、合計13種類を対象とした。このうち、石灰石骨材は4種類であり、これと比較する他の石質の骨材は9種類である。なお、ここでは場合により、石灰石骨材を石灰岩1などと、岩質で呼ぶこととする。他の石質の骨材も、同様である。石灰岩3および玄武岩1と2は青森県産、凝灰岩は秋田県産であり、他は岩手県産である。

表には、粗骨材の絶乾密度および吸水率を示しており、No.1～10の場合、密度や吸水率からは、良質骨材である

と評価され、実際にもコンクリート用として市販されている骨材である。これに対し、No.11～13の場合は、密度および吸水率とも、コンクリート用骨材の規格を大きく外れ、きわめて低品質な骨材であるといえる。これらは、コンクリート用としては使われず、路盤材などとして市販されている。コンクリート用として不適切な骨材まで対象としたのは、コンクリートの乾燥収縮に対する骨材品質の関わりを、広い観点から捉えようとの意図による。

粗骨材には、最大寸法20mmの碎石を用い、細骨材は同一産地の砕砂とした。したがって、粗骨材と細骨材とは、同一の石質の組み合わせとなる。碎石および砕砂は、

表-1 使用骨材

No.	岩質	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	比表面積 (m ² /g)
1	石灰岩1	2.66	0.73	0.19
2	石灰岩2	2.69	0.33	0.52
3	石灰岩3	2.68	0.67	1.35
4	石灰岩4	2.70	0.43	0.45
5	頁岩1	2.70	0.66	1.70
6	頁岩2	2.77	0.45	3.38
7	変輝緑岩1	2.73	0.80	2.22
8	変輝緑岩2	2.93	0.50	3.37
9	輝緑凝灰岩	2.83	0.56	0.86
10	砂岩	2.67	0.58	2.21
11	凝灰岩	2.33	5.88	3.63
12	玄武岩1	2.34	3.79	4.40
13	玄武岩2	2.24	6.58	9.47

*1 岩手大学 工学部社会環境工学科助教 博士(工学) (正会員)

*2 岩手大学大学院 工学研究科建設環境工学専攻 (非会員)

*3 岩手大学 工学部社会環境工学科准教授 理学博士 (非会員)

*4 岩手大学 工学部社会環境工学科教授 工学博士 (正会員)

表-2 コンクリートの配合

粗骨材の 最大寸法 (mm)	水セメント 比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (ℓ/m^3)				AE 減水剤 (kg/m^3)
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	
20	48	47	180	119	308	348	4.00

産地によって粒度分布が異なり、これが乾燥収縮に影響を及ぼす可能性があるため、すべての粗骨材および細骨材とも、No.7 と同一の粒度になるように調節して、その影響を消去するようにした。調整後の粗粒率は、細骨材で 3.14、粗骨材で 6.71 である。これらの骨材は、すべて表乾状態にして使用した。

セメントには、普通ポルトランドセメントを用い、混和剤としては、リグニンスルホン酸化合物の AE 減水剤を用いた。

2.2 コンクリートの配合

コンクリートの乾燥収縮には、単位水量や骨材容積割合など、多くの配合要因が関連する。ここでは、主として骨材の石質とコンクリートの乾燥収縮との関連を求めようとしている。この関連を明確にするため、いずれの骨材を用いたコンクリートも容積で表した配合を同一にし、違いは骨材の石質のみとすることにした。建築用のコンクリートを想定し、スランプ 18cm、空気量 4.5% を目標に、水セメント比 48%、細骨材率 47%として、No.7 の骨材を用いて試験練りを行ったところ、表-2 に示すような配合が得られた。他の骨材を用いた場合もこの配合に従い、骨材の単位量は容積でこれと同一にした。このようにして得られたコンクリートのスランプは、No.1～No.10 で 14.0～21.5cm、No.11、No.12 および No.13 でそれぞれ 12.5、13.5、0 cm であった。また空気量は、3.3～9.8% となった。

2.3 測定項目

コンクリートの乾燥収縮は、JIS A 1129-1 に従って求めた。供試体は $100 \times 100 \times 400$ mm の角柱であり、温度 20℃、相対湿度 60%での乾燥は、材齢 7 日で開始し、所定の乾燥期間で、コンパレータにより長さ変化を測定した。コンクリート供試体の本数はそれぞれ 3 本とした。

骨材については、砕石および砕砂の密度および吸水率を求めるとともに、粒径 0.15mm～0.074mm の試料を用いて、窒素吸着法により、BET 一点法に従って内部表面積を測定した。骨材の細孔径分布は、2.5～5.0mm に粗粉砕した試料を対象に、水銀圧入法によって測定した。また、骨材の産地から採取してきた岩石をコアボーリングし、 $\phi 20 \times 40$ mm に整形して、ヤング係数を求めた。同じく、岩石からコア採取した供試体を用いて、乾燥に伴う長さ変化も求めている。供試体は $\phi 20$ mm で、長さは 130mm 程度であり、ゲージ長が 100mm となるように両

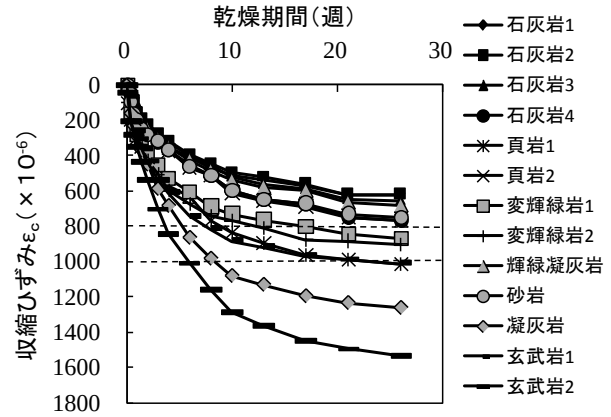


図-1 コンクリートの乾燥収縮

側 4 面にポイントを貼り付け、コンタクトゲージで長さ変化を測定した³⁾。

3. 実験結果および考察

3.1 コンクリートの乾燥収縮

乾燥期間 26 週までのコンクリートの乾燥収縮ひずみを図-1 に示す。なお、結果は供試体 3 本の平均値を示している。これらの乾燥 26 週における標準偏差は、最大で 47×10^{-6} 、最小で 11×10^{-6} であり、平均で 29×10^{-6} であった。したがって、本研究の実験値は、解析に足るものとして以後の検討をすることとした。

各コンクリートの違いは、用いた骨材の石質のみである。それにも関わらず、各コンクリートの収縮ひずみには、きわめて大きな差が見受けられ、コンクリートの乾燥収縮に、骨材が大きな影響を及ぼすことは疑いない。温度 20℃および相対湿度 60%の条件のもとで、乾燥 26 週における収縮ひずみの上限値を、土木学会では 1000×10^{-6} 、建築学会では 8×10^{-4} に規定している。コンクリート用骨材としての規格を満たさない 3 種類の低品質骨材を用いたコンクリートの収縮ひずみは、いずれも大きく、土木学会の上限値を超えている。また、規格を満たす骨材の中でも、頁岩 1 を用いたコンクリートの乾燥収縮は、土木学会の上限値を超える。これらに次いで大きな収縮ひずみとなったのは、変輝緑岩 1 および 2 を用いたコンクリートであり、土木学会の規定は満たしているものの、建築学会の規定からは外れる。これら以外では、建築学会の規定に外れるものは見当たらない。ただし、規格内の骨材は、合計 10 種類であり、そのうち 3 種類が建築学会の規定を満たさないとの結果となった。

石灰岩 1～3 を用いたコンクリートの収縮ひずみは、対象としたコンクリートの範囲内で最小の部類であり、これまで指摘されてきたとおりの結果となっている。ただし、石灰岩 4 については、建築学会の規定を辛うじて満たしているに過ぎず、石灰岩といえども、場合によっては比較的大きな収縮ひずみになり得ることに注意を要する。なお、石灰岩以外にも、輝緑凝灰岩を用いたコンクリートのように、石灰岩 1～3 に匹敵するような小さな収縮となっている骨材も見られている。

3.2 骨材の物性とコンクリートの乾燥収縮との関係

一般に、骨材の品質は、密度および吸水率で判定される。図-2 および図-3 は、骨材の絶乾密度および吸水率と材齢 26 週でのコンクリートの乾燥収縮との関係を示している。密度の場合 2.5g/cm^3 以上、吸水率の場合 3% 以下が、使用可能な骨材の目安となるが、図中ではこれらと、建築学会の乾燥収縮ひずみの上限値である 8×10^{-4} とを線引きしている。

両図より、骨材の密度が小さいほど、あるいは吸水率が大きいほど、収縮ひずみが大きくなる傾向にある。ただし、これは低品質骨材まで対象とした場合であり、それぞれの規格を満たす骨材のみを対象とすれば、相関はほとんど見られず、骨材の密度および吸水率でもって、コンクリートの乾燥収縮を解釈するには無理があるように思われる。すなわち、規格内の骨材であっても、骨材の密度が大きいほど、吸水率が小さいほど、骨材は良質であり、コンクリートの乾燥収縮は小さくなると予想されるが、そのような明確な傾向は見当たらない。

石灰岩 1～3 は、規格内の中で、相対的に小さな密度であるにも関わらず、これらを用いたコンクリートの乾燥収縮は小さい。石灰岩 1 および 3 は、規格内の中で、相対的にやや大きな吸水率であるにも関わらず、これらを用いたコンクリートの乾燥収縮は小さい。したがって、石灰岩を用いたコンクリートの乾燥収縮が小さい理由を、骨材の密度や吸水率では解釈できないことになる。

コンクリートの乾燥収縮には、用いる骨材によって比較的大きな差があるとの結果が得られた。この差をもたらす要因を探ってみる。この際、コンクリートの乾燥収縮としては、与えられた乾燥条件での平衡値を用いる。なぜなら、収縮の発現には、コンクリートによって緩急の違いがあり、注目する乾燥期間によって収縮の差が異なるからである。平衡値に着目すれば、収縮発現の緩急の違いによる影響を消去できる。

平衡値を求める例として、頁岩 1 を用いたコンクリートを取り上げる。図-4 は、このコンクリートの乾燥収縮の経時変化を示している。この経時変化を双曲線とみなし、図中に示したような近似式をあてはめ、最小二乗法によって、係数 a および b を決定する。この近似式によ

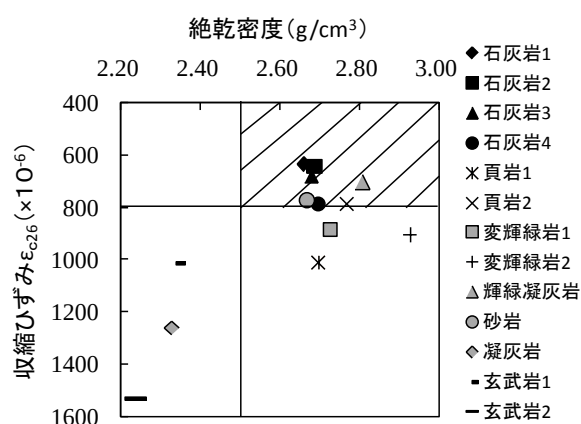


図-2 骨材の密度とコンクリートの乾燥収縮の関係

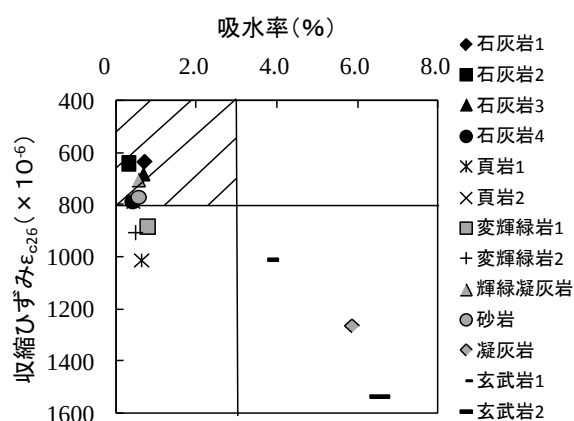


図-3 骨材の吸水率とコンクリートの乾燥収縮の関係

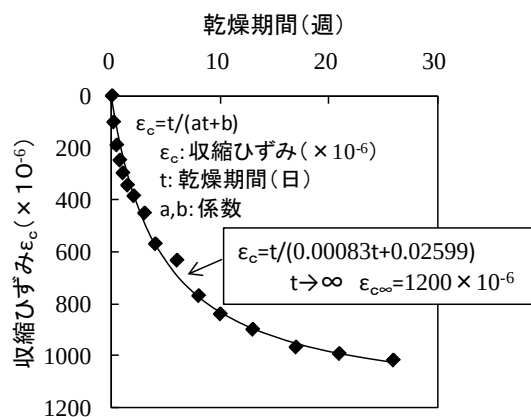


図-4 頁岩 1 を用いたコンクリートの乾燥収縮

り、 t を無限大としたときの収縮ひずみを算出し、これを平衡値として以下の検討を行うこととした。なお、実験では、水セメント比 48% の硬化ペーストの乾燥収縮も測定しており、同様に平衡値を求めたところ、 3650×10^{-6} の値が得られている。

コンクリートの乾燥収縮の観点から、骨材に期待する役割は、基本的にペーストの収縮を拘束することにある。

この際、骨材に望まれる性質は、変形に対する抵抗能

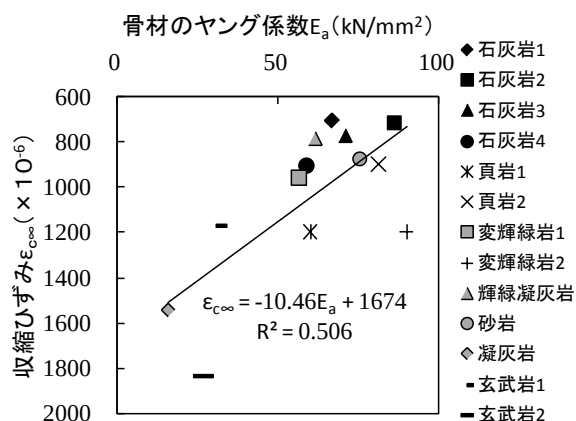


図-5 骨材のヤング係数とコンクリートの乾燥収縮の関係

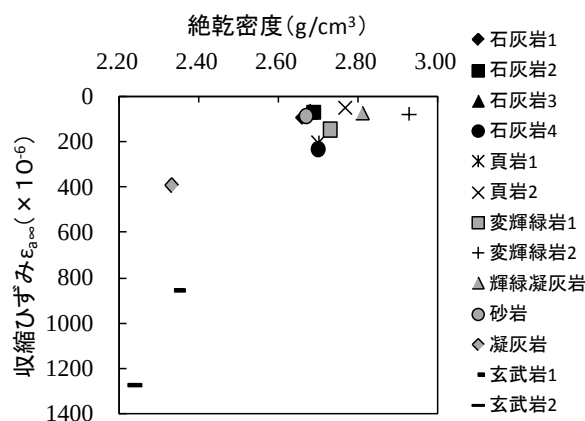


図-7 骨材の密度と骨材の乾燥収縮の関係

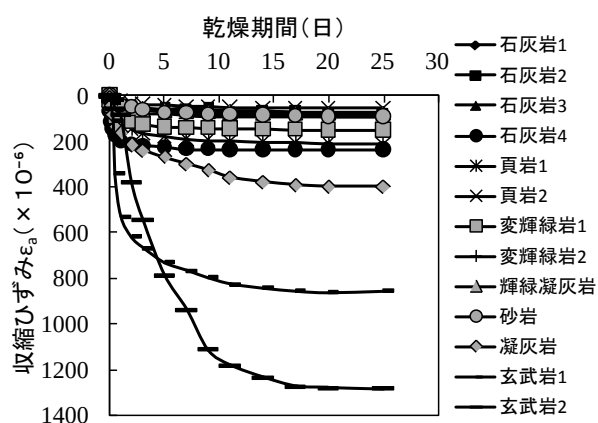


図-6 骨材の乾燥収縮

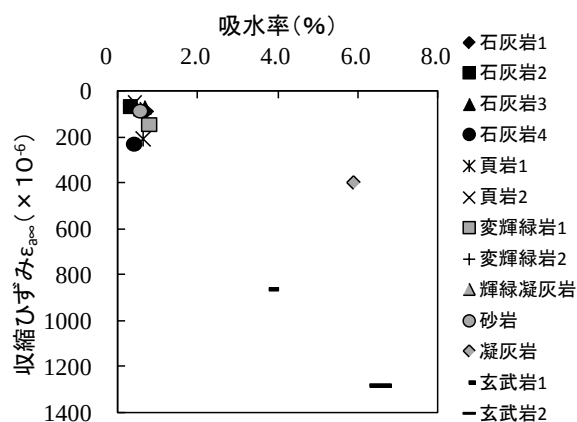


図-8 骨材の吸水率と骨材の乾燥収縮の関係

力であり、力学的には、大きなヤング係数となる。図-5は、骨材のヤング係数とコンクリートの乾燥収縮との関係を示している。

ヤング係数には、骨材によって大きな差がみられ、低品質骨材のヤング係数はきわめて小さい。この低品質骨材を含めると、コンクリートの乾燥収縮は骨材のヤング係数に大略的に逆比例する関係が成り立つ。換言すれば、ペーストの収縮を拘束する骨材の能力が、コンクリートの乾燥収縮に関わっていることになる。しかし、規格内の骨材に限定すれば、骨材のヤング係数が大きいほど、コンクリートの収縮が小さくなるという明確な関係は認めがたい。すなわち、ヤング係数でもって、一義的にコンクリートの収縮を解釈するには無理がある。

石灰岩 2 の場合、ヤング係数はきわめて大きく、これを用いたコンクリートの収縮は小さい。しかしながら、石灰岩 1 および石灰岩 3 は、相対的にヤング係数が小さいにも関わらず、コンクリートの収縮は、石灰岩 2 と同等となっており、石灰岩を用いたコンクリートの収縮が小さい理由を、骨材のヤング係数のみで説明することはできない。石灰岩 4 を用いたコンクリートは、相対的に

大きな収縮を示した。この理由のひとつとして、骨材のヤング係数が小さいことを取り上げるのは可能であるように思われる。

3.3 骨材自体の乾燥収縮

乾燥に伴い、骨材自体もある程度収縮し、しかも収縮値は骨材によって比較的大きく異なることが、早くに指摘されていた³⁾。しかし、この指摘が取り上げられる機会はほとんどなく、これまで、骨材はほとんど無収縮であると考えられ、骨材自体の乾燥収縮は看過されてきた感がある。図-6 は、本実験で対象とした骨材の乾燥に伴う収縮を示している。乾燥前に十分吸水させ、飽水状態から出発した場合の乾燥収縮であり、コンクリートの乾燥収縮を求める実験でも、骨材は飽水状態で用いた。

低品質の玄武岩の場合、それ自体の収縮は、これを用いたコンクリートの収縮に比べて小さいものの、その差は小さく、過大な収縮であるといえる。規格内の骨材の場合、おしなべて小さな収縮であり、コンクリートの収縮よりきわめて小さく、ペーストとの比較では、1 桁小さい収縮となっている。しかし、値は小さくとも、骨材自体が収縮するのは紛れもない事実であり、しかもその収縮値には、骨材によって比較的大きな差がみられる。

石灰岩に着目すれば、石灰岩 1～3 の乾燥収縮は小さく、石灰岩 4 の収縮は、規格内で最大となっている。

骨材の場合、供試体が小さいこともあって、乾燥 25 日で、収縮ひずみはほぼ平衡に達しているとみなすことができる。そこで、この時点での収縮ひずみを平衡値とし、これを骨材の物性との関連で検討してみる。図-7 および図-8 は、それぞれ骨材の密度および吸水率と骨材の乾燥収縮との関係を示している。

低品質骨材を含めれば、密度が大きいほど、吸水率が小さいほど、骨材自体の収縮が小さいという概略的な関係が認められる。しかし、規格内の骨材に限定した場合、その関係は明確でない。たとえば、石灰岩 1～3 は、相対的に小さな密度であるが、骨材自体の収縮は小さい。したがって、規格内では、骨材自体の収縮を密度および吸水率では解釈できないことになる。

この骨材自体の収縮に関連する要因として、内部表面積を見出した先例³⁾がある。図-9 は、本実験で対象とした骨材の内部表面積と骨材の乾燥収縮との関係を示している。

両者には明確な比例関係が見られ、内部表面積が大きいほど、収縮が大きい。低品質骨材の場合、内部表面積が大きく、たとえば玄武岩 2 では、内部表面積がきわめて大きいため、骨材自体の収縮が過大になるといえる。この傾向は、これまでの結果と同様である^{2),3)}。注目すべきは、低品質骨材を除いて、規格内骨材に限定した場合でも、骨材自体の収縮が、内部表面積と比例関係にあることであり、石灰岩 1～3 の収縮が小さいのは、内部表面積が小さいためであるといえる。一方、相対的に大きな収縮を示した石灰岩 4 の場合、内部表面積は相対的に大きくなっている。

図-10 は、水銀圧入法によって求めた石灰岩の細孔径分布を示している。細孔径が $0.01\mu\text{m}$ 近辺の微細な空隙に着目すれば、石灰岩 1～3 と石灰岩 4 とで、違いが見られ、石灰岩 4 で、この径の細孔量が多い。内部表面積は、主として微細な空隙の量に関連し、この空隙が多いほど、内部表面積が大きい。そのため、石灰岩 4 では内部表面積が大きく、骨材自体の収縮も大きくなったといえる。

図-11 は、骨材自体の乾燥収縮とコンクリートの乾燥収縮との関係を示している。低品質骨材まで対象とすれば、両者には概ね比例関係が認められ、骨材自体の収縮が大きいほど、コンクリートの収縮が大きい。石灰岩 1～3 を用いたコンクリートの収縮が小さいのは、主として骨材自体の収縮が小さいためであり、逆に、石灰岩 4 では、骨材の収縮が相対的に大きいため、コンクリートの収縮が比較的大きくなるといえる。ただし、規格内の骨材に限定すれば、この傾向から逸脱するものも見られ、

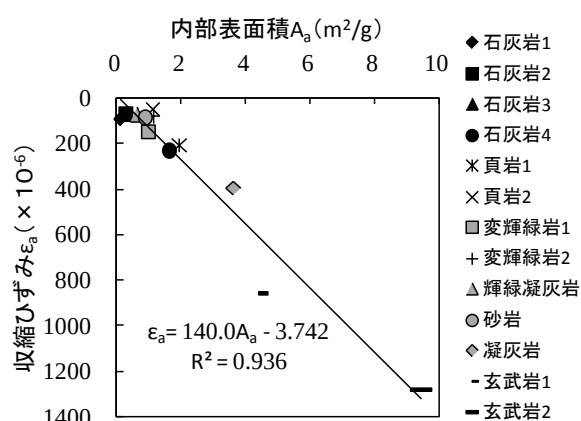


図-9 骨材の内部表面積と骨材の乾燥収縮の関係

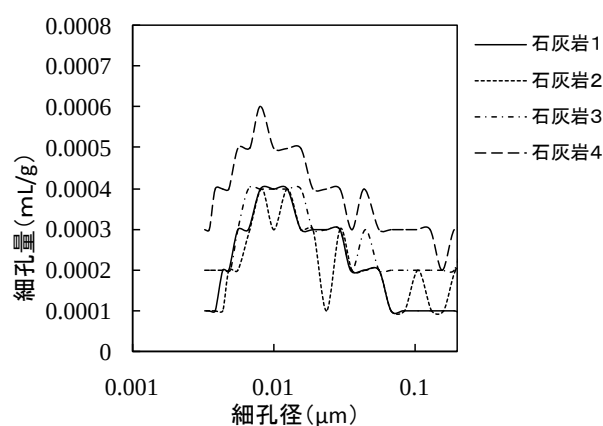


図-10 石灰岩の細孔径分布

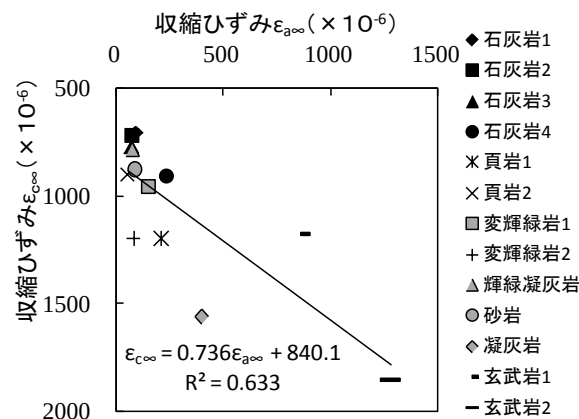


図-11 骨材の乾燥収縮とコンクリートの乾燥収縮の関係

コンクリートの収縮を骨材自体の収縮のみで解釈できない面がある。

3.4 複合則による検討

コンクリートの乾燥収縮に果たす骨材の基本的役割は、ペーストの収縮を拘束することにある。一方、骨材自体も収縮するとすれば、それはコンクリートの収縮にとって、能動的な要因となる。ペーストの収縮を拘束す

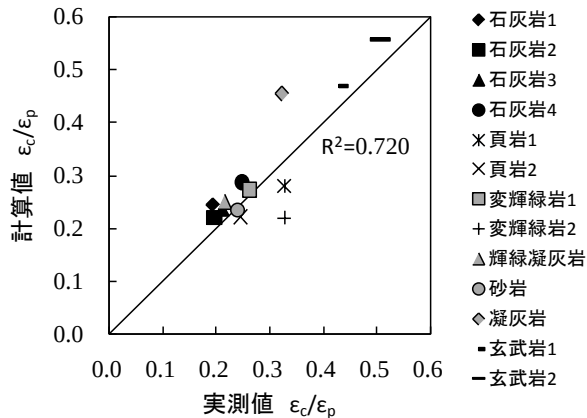


図-12 $\varepsilon_c/\varepsilon_p$ の実測値と計算値の関係

る能力をヤング係数で表し、それとコンクリートの収縮との関連を図-5において検討した。また、図-11では、骨材自体の収縮を測定し、それとコンクリートの収縮との関係も検討した。その結果、いずれの場合もある一定の関係は成立するが、それぞれ単独では、コンクリートの収縮を一義的に解釈できないことが判明した。

骨材自体のヤング係数および収縮が、コンクリートの収縮に関連することは疑いないと思われ、これを検討するには、コンクリートの乾燥収縮に関する力学的な複合則を援用する必要がある。コンクリートをペーストと骨材とで構成される複合材料とみなし、構成材料の物性からコンクリートの収縮を予測する複合式は、数多く提案されており、その中で、次に示す Hansen-Nielsen 式⁴⁾の適用性が高いとされている³⁾。

$$\varepsilon_c/\varepsilon_p = (1-m)\{n+1+(n-1)V_a^2-2nV_a\}/(n+1)+m \quad \text{for } n \geq 1 \quad (1)$$

$$\varepsilon_c/\varepsilon_p = (1-m)\{n+1-(n+1)V_a\}/\{n+1+(n-1)V_a\}+m \quad \text{for } n \geq 1 \quad (2)$$

ε_c : コンクリートの乾燥収縮ひずみ, ε_p : セメントペーストの乾燥収縮ひずみ, ε_a : 骨材の乾燥収縮ひずみ, V_a : 骨材の体積比, $m : \varepsilon_a/\varepsilon_p$, $n : E_a/E_p$, E_a : 骨材のヤング係数, E_p : セメントペーストのヤング係数

この式によって、コンクリートの乾燥収縮の平衡値を計算し、実測値と比較したのが、図-12である。計算値は、実測値とよく適合している。これは、構成材料のヤング係数および収縮が複合的に作用し、最終的なコンクリートの収縮を決定することを意味している。換言すれば、骨材自体のヤング係数および収縮も、コンクリートの収縮に関連することになる。

たしかに、低品質骨材を除けば、骨材自体の収縮は小さい。しかし、本実験の配合では、コンクリート中で、骨材は約 2/3 の容積を占める。たとえ、収縮の絶対値は小さくとも、容積的に多大な割合を占めれば、その影響

は大きくなる。これまで、コンクリートの収縮に果たす骨材の役割としては、ペーストの収縮を拘束することのみ目が向きがちであったが、骨材そのものも収縮することに注意を払う必要がある。

4. まとめ

本研究では、石灰石骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮特性を、他の石質の骨材の場合と比較しながら把握しようとした。得られた結果をまとめれば、以下のようになる。

- 1) 石灰石骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮は、小さい傾向にあり、収縮低減の一つの方法として、有効であることが確認できた。ただし、中には比較的大きな収縮を示す例もあり、すべての石灰石骨材が収縮の抑制に有効であるとは限らない点に注意を要する。一方、他の石質の骨材でも、コンクリートの収縮が小さくなる場合もある。
- 2) 石灰石骨材を用いて小さな収縮を示したコンクリートの場合、骨材自体の収縮が小さく、それがコンクリートの収縮を小さくする大きな要因になると考えられる。骨材自体の収縮が小さいのは、内部表面積が小さいためであることが確認できた。微細な空隙の少ないことが、内部表面積を小さくするといえる。
- 3) コンクリートの乾燥収縮には、骨材自体のヤング係数および収縮の両方が複合されて関連する。このことは、複合則による検討によって確かめられた。

終わりに、本研究の遂行に多大なご尽力を賜った岩手県生コンクリート工業組合技術センターの袴田豊課長をはじめ、センターの各位に、深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) 片平博, 渡辺博志: 骨材がコンクリートの乾燥収縮率に与える影響の簡易推定法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.97-102 (2009)
- 2) 今本啓一ほか: 各種骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮特性と骨材比表面積の影響, 日本建築学会構造系論文集, 第 606 号, pp.9-14 (2006)
- 3) 後藤幸正, 藤原忠司: 乾湿に伴う骨材の体積変化, 土木学会論文報告集, No.247, pp.97-108 (1976)
- 4) Hansen, T. C and Nielsen, K. E. C.: Influence of aggregate properties on concrete shrinkage, Journal of ACI, Vol. 62, No. 7, pp.783-794, 1965
- 5) 後藤幸正, 藤原忠司: コンクリートの乾燥収縮に及ぼす骨材の影響, 土木学会論文報告集, No.286, pp.125-137 (1979)