

論文

石灰質骨材を用いた コンクリートの乾燥収縮特性

小田島 悠 弥^{※1)}藤 原 忠 司^{※2)}小山田 哲 也^{※3)}袴 田 豊^{※4)}越 谷 信^{※5)}

1. はじめに

コンクリートの構成材料として骨材を用いるひとつの理由は、ペースト硬化体のみでは乾燥収縮が著しく、夥しいひび割れが発生して構造材料たり得ないため、骨材でペーストの収縮を拘束し、ひび割れの発生を抑制することにある。この観点から、骨材に望まれる性質は、変形に対する抵抗能力であり、概念的に表現すれば、緻密で堅硬な骨材が選択的に使用されてきたといえる。

たとえ良質と評価される骨材を用いても、コンクリートが乾燥収縮から免れるわけではない。幸い、乾燥収縮によって発生するコンクリートのひび割れは、一般に微細であり、深さも表面近傍に限られ、耐久性や美観などにそれほど影響を及ぼさないと考えられてきたためか、コンクリートに収縮ひび割れは付きもので心配には及ばない、との説明で済まされてきた感がある。ところが、「住宅の品質確保の促進等に関する法律」が施行されて以来、ひび割れに対する関心が高まり、収縮ひび割れによって構造物の耐力までが懸念される事例（土木学会¹⁾）が発生するに至って、コンクリートの乾燥収縮がこれまでとは比較にならないほど問題視されるようになっている。

コンクリートの乾燥収縮には種々の要因が関連する。その中で、最近は骨材の物性の影響を指摘する例（日本建築学会²⁾）が多い。骨材によって、コンクリートの収縮が相違することは、かなり早くから指摘されていた（後藤・藤原³⁾）が、収縮の問題が浮上して、再びこれに注目が集まった感がある。とくに、石灰質の骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮は小さい値を示すため、この骨材の使用を望む傾向にあるようである（吉兼⁴⁾）。しかし、

特定の骨材に需要が偏れば、需給のバランスが崩れ、重大な問題を派生させかねず、そもそも石灰質骨材のすべてが収縮抑制に役立つかという疑問も残る。また、石灰質骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮が小さくなる理由についても明らかになっていない。

本研究では、石灰質骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮に着目し、他の石質の骨材と比較しながら、その特性を明らかにしようとした。

2. 実験概要

2.1 使用材料

対象とした骨材を表1に示す。いずれも、コンクリート用として市販されている骨材であり、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碎砂とした。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。碎石および碎砂は、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、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。

表1 使用骨材

石質	表乾密度(g/cm ³)	吸水率(%)
石灰岩1	2.68	0.73
石灰岩2	2.69	0.33
石灰岩3	2.71	0.43
石灰岩4	2.70	0.67
頁岩1	2.72	0.66
頁岩2	2.78	0.45
変輝緑岩	2.75	0.80
輝緑凝灰岩	2.83	0.56
砂岩	2.68	0.58

※1) 岩手大学大学院工学研究科 建設環境工学専攻

※2) 岩手大学工学部 社会環境工学科 教授 工博

※3) 岩手大学工学部 社会環境工学科 助教 博士(工学)

※4) 岩手県生コンクリート工業組合中央技術センター 指導開発課長 博士(工学)

※5) 正会員 岩手大学工学部 社会環境工学科 准教授 理博

表2 コンクリートの配合

粗骨材の最大寸法 Gmax (mm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位容積(m^3)			
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G
20	48.0	47.0	180	119	308	348

対象とした骨材は合計9種類で、そのうち4種類が石灰質であり、石灰岩3が青森県産で、他は岩手県産である。表には、粗骨材の密度および吸水率を示しており、いずれの骨材も、これらの物性値からは、良質骨材であると評価される。

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るとしている。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。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、1種類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。

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100×100×400mmの角柱であり、7日間、20°Cの水中で養生した後、温度20°C、相対湿度60%で乾

燥を開始し、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。

骨材については、碎石および碎砂の密度と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。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、Φ20×40mmに整形して、ヤング率を求めた。同じく、岩石から別途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Φ20mmで、長さは130mm程度であり、ゲージ長が100mmとなるように両側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. 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。

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、比較的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°C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。対象としたコンクリ

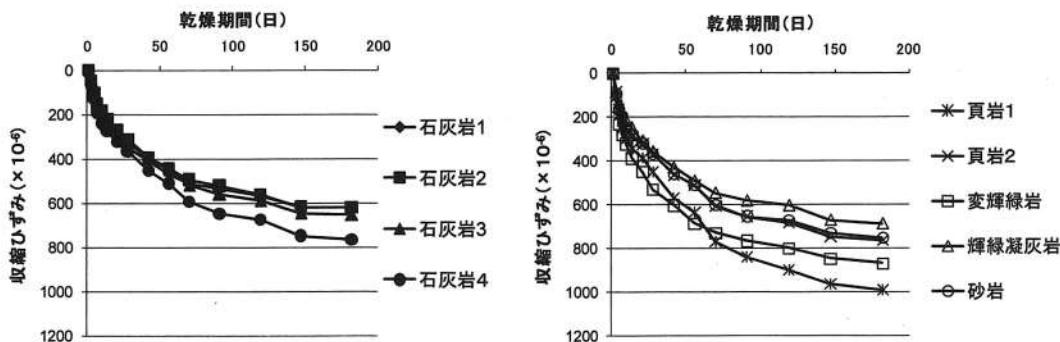


図1 コンクリートの乾燥収縮

ートの中で、もっとも大きな収縮ひずみを示したのは、頁岩1を用いたコンクリートであり、土木学会の上限値に迫っている。これに次いで大きな収縮ひずみとなったのは、変輝緑岩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。

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。顕微鏡下での観察では、石灰岩1～3はほぼ100%方解石により構成されているのに対し、石灰岩4はわずかではあるが、石英や緑泥石などの不純物を含む。たとえば、輝緑凝灰岩を用いたコンクリートの収縮は、石灰岩1～3に匹敵するような小さな値となっている。石灰岩はセメントの原料であるなど、貴重な資源であることを考慮すれば、石灰質骨材に拘らず、他の石質で収縮を抑制できるような骨材を選択するのが、石灰資源の温存からも望ましいと指摘できる。

3.2 骨材の物性とコンクリートの乾燥収縮との関係

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

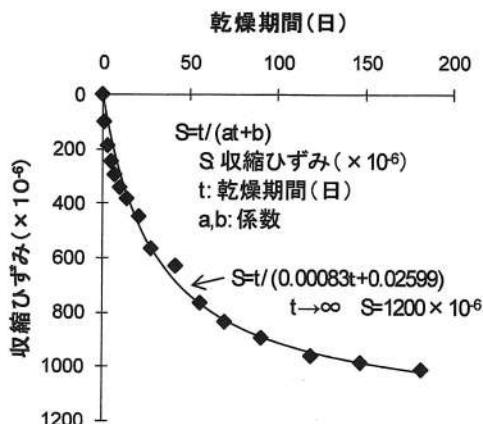


図2 頁岩1を用いたコンクリートの乾燥収縮

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2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。この近似式により、乾燥期間tを無限大としたときの収縮ひずみを算出し、これを平衡値とする。

図3は、各コンクリートの収縮の平衡値であり、乾燥26週における収縮ひずみも併せて示しておいた。以降の検討では、コンクリートの収縮ひずみとして、この平衡値を対象とする。

一般に、骨材の品質は、密度および吸水率で判定される。図4および図5は、骨材の表乾密度および吸水率とコンクリートの乾燥収縮との関係を示している。

両図より、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と思われる。すなわち、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。密度の場合2.5g/cm³以上、吸水率の場合

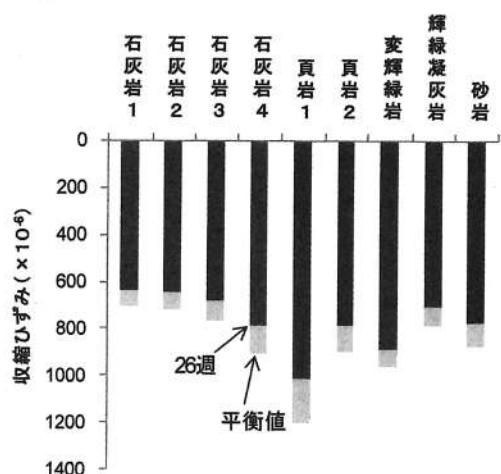


図3 コンクリートの乾燥収縮の平衡値

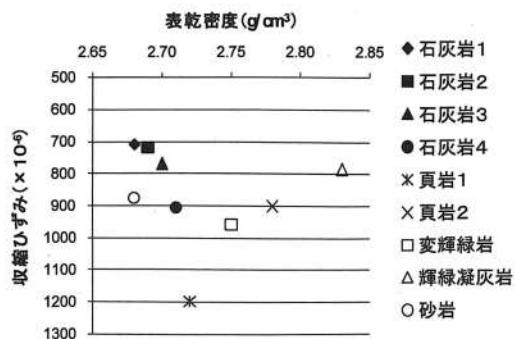


図4 骨材の密度とコンクリートの乾燥収縮の関係

3%以下が、使用可能な骨材の目安となる。対象とした骨材の場合、いずれもが密度 $2.6\text{g}/\text{cm}^3$ 以下で、吸水率1%以下であり、きわめて良質であるとして差し支えない。品質がきわめて良質な骨材同士の比較であるため、骨材の密度や吸水率とコンクリートの乾燥収縮の間には、明確な関係が存在しないとの見方もあるうが、広範囲の品質の骨材を対象とした場合でも、一定の関係は成立しないとしている先例（後藤・藤原³⁾）がある。

石灰岩1～3は、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、相対的に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。

前述のように、骨材に期待する役割は、ペーストの収縮を拘束することにある。この観点から、骨材に望まれる性質は、変形に対する抵抗能力であり、力学的には、大きなヤング率となる。図6は、骨材のヤング率とコンクリートの乾燥収縮との関係を示している。

密度や吸水率の観点から、対象とした骨材のいずれもが、きわめて良質であると考えられるにも関わらず、ヤング率には、骨材によって比較的大きな差がみられる。たとえば、頁岩1を用いたコンクリートの場合、骨材のヤング率が小さいため、ペーストの収縮を拘束する能力が低く、コンクリートの乾燥収縮が大きくなると解釈できる。しかしながら、全体的には、骨材のヤング率が大きいほど、コンクリートの収縮が小さくなるという明確

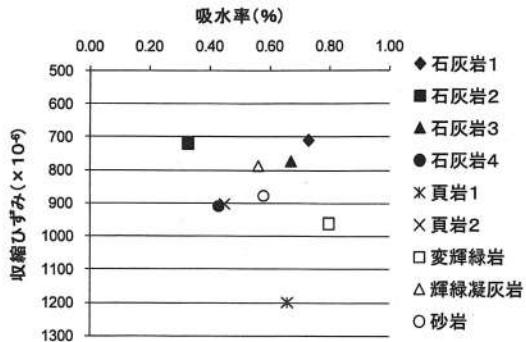


図5 骨材の吸水率とコンクリートの乾燥収縮の関係

な関係は認めがたい。すなわち、ヤング率でもって、一義的にコンクリートの収縮を解釈するのは無理であるといえる。

石灰岩2の場合、ヤング率はもっとも大きく、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、相対的にヤング率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、骨材のヤング率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、比較的大きな収縮を示した。この理由のひとつとして、骨材のヤング率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

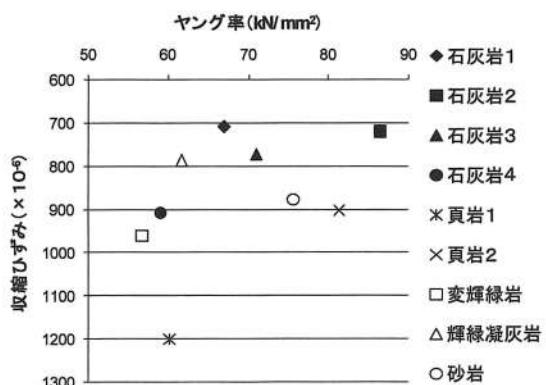


図6 骨材のヤング率とコンクリートの乾燥収縮の関係

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（後藤・藤原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7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、実際に、骨材は飽水状態でコンクリートに使われている。

コンクリートに比べれば、きわめて小さな収縮であり、ペーストとの比較では、1桁小さい収縮であるといえる。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20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8および図9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。

密度および吸水率とも、骨材の乾燥収縮にはほとんど関連しないとの結果になっている。石灰岩についても、前述の図4および図5と同様の考察が可能であり、石灰岩自体の収縮を密度および吸水率では解釈できない。骨材の密度および吸水率と乾燥収縮との間に明確な関係が存在しないことは、広範囲の骨材を対象とした先例（後藤・藤原³⁾）で既に指摘されており、本結果も同様とな

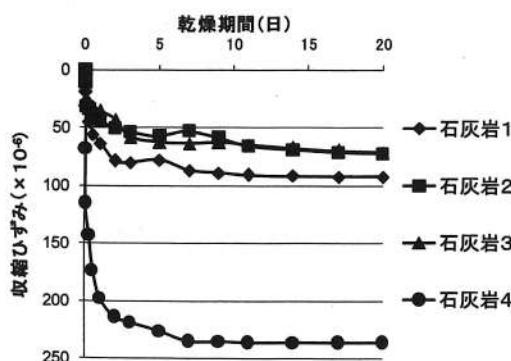


図7 骨材の乾燥収縮

っている。

この先例では、骨材自体の収縮に関する要因として、内部表面積を見出した。図10は、本実験で対象とした骨

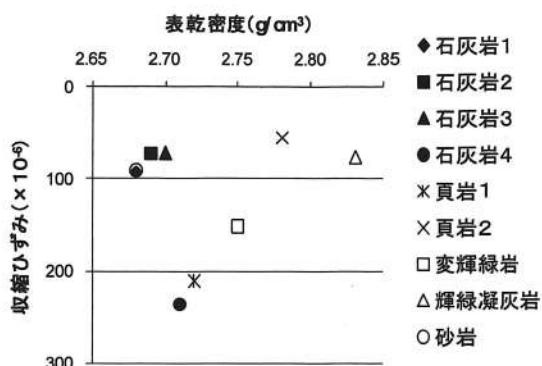


図8 骨材の密度と骨材の乾燥収縮

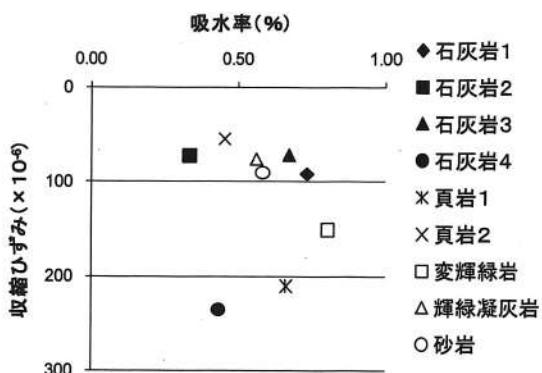
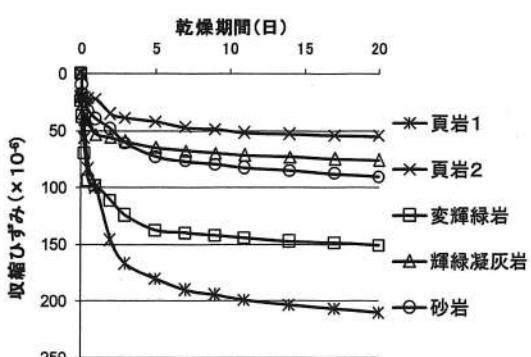


図9 骨材の吸水率と骨材の乾燥収縮の関係



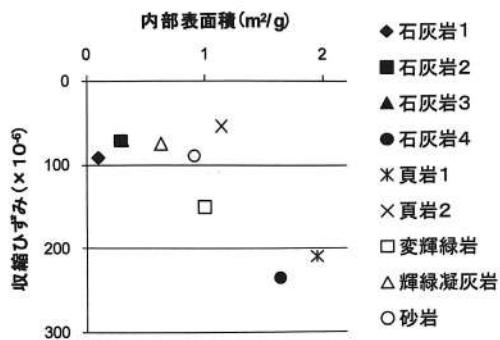


図10 骨材の内部表面積と骨材の乾燥収縮の関係

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。内部表面積とは、骨材内部に存在する空隙の表面積である。一方、吸水率は、空隙の容積に関わる。乾燥収縮は、空隙に存在していた水分の逸散によって生じる。乾燥収縮の機構については、諸説があつて、いまだに決着がついていないと考えられるが、先例（後藤・藤原³⁾）では、骨材の場合、表面エネルギーの変化が乾燥収縮をもたらすとしている。すなわち、空隙の表面に水分が吸着していれば、骨材の実質部分は低い表面エネルギーの状態にあり、膨潤しているが、水分が脱着することによって、実質の表面エネルギーが高まり、実質は収縮するとの考え方である。これに従えば、水分の吸着および脱着に関わる部分が長さ変化にとって重要であり、それは骨材の内部表面ということになる。そのため、骨材の収縮は、内部表面積によって基本的に定まるといえる。内部表面に吸着している以外の水分は、収縮にほとんど関連しない。いかに含まれる水分が多くても、換言すれば吸水率が大きくても、内部表面積が小さければ、収縮は大きくならない。骨材の収縮を吸水率で解釈できない理由は、この点にあると考えられる。

骨材の内部表面積と乾燥収縮の関係より、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。たとえば、同じ空隙容積であっても、大きな空隙が多いほど、内部表面積は小さい。石灰岩1お

よび3は、相対的に大きな吸水率を有するが、空隙が比較的粗大であるため、内部表面積が小さいと推察される。石灰岩2の吸水率は小さく、そもそも空隙が少ないので、内部表面積が小さいと考えられる。

3.4 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

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。ばらつきはあるものの、両者にはほぼ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。

たしかに、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にのみ目が向かがちであったが、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、石灰質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

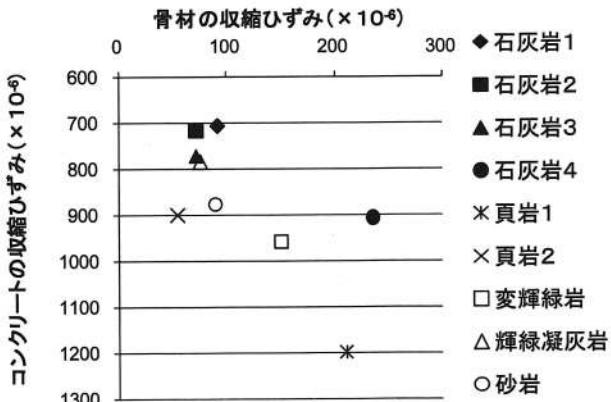


図11 骨材の乾燥収縮とコンクリートの乾燥収縮の関係

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) 石灰質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る。ただし、中には比較的大きな収縮を示す例もあり、すべての石灰質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。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り、石灰資源の温存の観点からは、そのような骨材の使用に目を向けるべきであると考えられる。
- 2) 一般に、骨材はペーストの収縮を拘束し、コンクリートの収縮を小さくする役割を果たすと考えられている。しかし、石灰岩の骨材を用いて小さな収縮を示したコンクリートについて、骨材のヤング率との関連を検討してみたところ、必ずしも拘束効果のみで、小さな収縮を説明できないことが判明した。
- 3) 石灰質骨材を用いて小さな収縮を示したコンクリートの場合、主として骨材自体の収縮が小さいため、コンクリートの収縮が小さくなると考えられる。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。

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の関係各位に、ならびに有益なご指摘・ご助言を頂いた匿名の査読者に、深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：垂井高架橋損傷対策特別委員会・中間報告（2005）
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ－メカニズムと対策技術の現状（2003）
- 3) 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、土木学会論文集、No.286、pp.125-137（1979）
- 4) 吉兼亨：乾燥収縮ひずみの規制へのレディーミクストコンクリート業界の対応、コンクリート工学、Vol.46、No.11、pp.3-8（2008）

Drying Shrinkage of Concrete Using Limestone Aggregate

Yuya ODASHIMA, Tadashi FUJIWARA,
Tetsuya OYAMADA, Yutaka HAKAMADA,
Shin KOSHIYA