

コンクリートの乾燥収縮率に及ぼす天然砂および 砕砂の影響

EFFECT OF NATURAL SAND AND CRUSHED SAND ON DRYING SHRINKAGE STRAIN OF
CEMENT CONCRETE

今井忠男*・大口宏栄**・杉本文男***

by Tadao IMAI, Kouei OHGUCHI and Fumio SUGIMOTO

1. はじめに

現在、製造されているコンクリートの多くは、粗骨材に碎石、細骨材に天然砂という配合が多い。粗骨材は、天然砂利から碎石に代替されつつあるが、細骨材に砕砂を用いると、コンクリートの流動性が確保されにくいいため、細骨材には天然砂が好まれている。

碎石・砕砂は、その原石が明らかであるため、品質の管理が容易であるが、天然の砂や砂利は、不均質であり、力学物性などの品質を把握しにくい面がある。コンクリートの乾燥収縮問題に関しても、粗骨材である碎石の乾燥収縮率は、原石を用いて評価が可能であるが¹⁾、天然砂の乾燥収縮率は、今のところ測定が難しい。

本研究では、コンクリートの乾燥収縮現象に対し、細骨材としての天然砂が及ぼす影響を、砕砂と比較・検討した。具体的には、コンクリートの乾燥収縮率に関して、(1)粗骨材と細骨材の影響の比較、(2)細骨材の粒度の影響、(3)天然砂の産地の影響および砕砂の影響との比較等を、実験によって明らかとした。

2. 研究理論

2. 1 コンクリートの乾燥収縮に及ぼす細骨材の影響

(1) 粗骨材と細骨材の影響の差

骨材の乾燥収縮は、亀裂や層理など、岩石の構造に起因する場合も多い²⁾。これら岩石内の構造が乾燥収縮率の主たる要因なら、岩石を破碎・粉碎し構造を無くしていくと、強度が増加するように、岩石の乾燥収縮率も小さくなると考えられる。しかし、骨材の乾燥収縮の主たる要因が、乾燥収縮しやすい粘土鉱物等の含有率に起因するな

ら³⁾、骨材の粒度に関わらず、乾燥収縮率は一定と考えられる。ただし、この仮説では、風化が進み、破碎すると粘土鉱物が剥離して粉化するような、軟弱な岩石は除くものとする。

本研究では、これらの仮説を検証し、粗骨材と細骨材を合わせた、全骨材の平均的な乾燥収縮率を算定する手法を提案した。

(2) 細骨材の粒度の影響

細骨材の粒度に関し、砕砂は粒度調整がおこなわれているので大きな差はないが、天然砂は、産地によるバラツキが大きい。この粒度の違いは、コンクリートの流動性に大きな影響を与えるが、コンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響は、あまり知られていない。このような、フレッシュコンクリートの性状の違いが、コンクリートの乾燥収縮に影響を及ぼす可能性も考えられる。よって、本研究では、天然砂の粒度の影響も検証した。

(3) 天然砂の産地の影響および砕砂との比較

コンクリートの乾燥収縮現象に関し、粗骨材の乾燥収縮率の影響だけが注目されている。これは、細骨材に用いられる天然砂は、ほとんど乾燥収縮しないということを前提としているためである。天然砂の乾燥収縮率の測定例はないが、理論的には、石英粒子が多いため、乾燥収縮率は極めて小さいと推定される。さらに、骨材に天然の砂や砂利など、形状が丸い骨材を用いると、コンクリートの流動性が良くなるため、単位水量が低減でき、セメントペーストの割合が少なく、乾燥収縮し難いコンクリートが作製できる⁴⁾。このような作製条件からも、天然砂の使用は、コンクリートの乾燥収縮率を抑制すると思われる。

しかし、同じ作製条件において、天然砂を用いたコンクリートは、砕砂を用いた場合に比較し、乾燥収縮が抑制されるという研究結果は、これまで示されていない。さらに、天然砂の産地の違いが、コンクリートの乾燥収縮率に及ぼす影響についても、全く知られていない。

* 秋田大学大学院 准教授 工学資源学研究科 地球資源学専攻 (〒010-0852 秋田市手形学園町1-1)、

** 秋田大学 学生 工学資源学部、*** 秋田大学大学院 教授 工学資源学研究科 地球資源学専攻

著者らの研究では⁵⁾、砕砂を用いた場合、骨材全体の乾燥収縮率が小さくなるにしたがい、コンクリートの乾燥収縮率は十分小さくなることが示されている。これに対し、真野らの研究では⁶⁾、天然砂を用いたコンクリートにおいて、乾燥収縮率が十分小さい粗骨材を使用しても、コンクリートの乾燥収縮率はあまり低下しないこと明らかとなった。このことから、著者らは、同一作製条件のコンクリートにおいては、砕砂より天然砂の方が、コンクリートの乾燥収縮を抑制しにくいと仮定し、実験によって実証を試みた。

2. 2 セメントペーストの乾燥収縮率の推定法

天然砂がコンクリートの乾燥収縮を抑制しにくい要因について、著者らは、天然砂の乾燥収縮率が大きいだけでなく、天然砂を用いるとコンクリート中のセメントペーストが収縮しやすくなるためと仮定した。

著者らは、これまでコンクリートの乾燥収縮率 ϵ_{co} について、コンクリートをセメントペースト部と骨材部に分け、それぞれの体積割合 V_{cp} および V_a と、乾燥収縮率 ϵ_{cp} および ϵ_a から、 ϵ_{co} を次式で表せることを明らかにした⁷⁾。

$$\begin{aligned} \epsilon_{co} &= V_{cp} \epsilon_{cp} + V_a \epsilon_a \\ &= V_{cp} (\epsilon_{cp} - \epsilon_a) + \epsilon_a \quad \dots (1) \end{aligned}$$

ただし、 V_{cp} (セメントペースト率) は、単位水量 W および水セメント比 W/C 等の配合で決まる値である。

また、骨材全体の乾燥収縮率 ϵ_a は、粗骨材および細骨材の乾燥収縮率 ϵ_G および ϵ_s と細骨材率 s/a によって、次式で定義できる。

$$\epsilon_a = (1-s/a) \epsilon_G + (s/a) \epsilon_s \quad \dots (2)$$

ここで、天然砂を用いた場合のコンクリートについては、天然砂の乾燥収縮率 ϵ_s が直接測定できないため、式(1)では、このセメントペーストの乾燥収縮率 ϵ_{cp} も算定できない。

以上のことから、本研究では、石英の多い天然砂の乾燥収縮率をほぼ0と仮定し、セメントペーストの乾燥収縮率 ϵ_{cp} を式(1)より求めた。

3. 実験方法

3. 1 骨材試料

表1に、実験に用いた粗骨材の原石に関する基礎物性値を示す。骨材原石には、乾燥収縮率が異なる3種の岩石を用いた。また、表2には、細骨材に用いた産地が異なる3つの天然砂(a、b、c)の物性値を示す。これらの平均粒度は、ほぼ等しい。なお、比較のため、粗骨材用の岩石から作製した砕砂も細骨材として用いた。

3. 2 コンクリート試験片の作製および測定の方法

コンクリートの乾燥収縮率の測定法には、著者らの簡易法⁷⁾を用いた。コンクリート試験片の作製には、モルタルバー法(アルカリシリカ反応性試験)で用いられる型枠(角柱、40×40×160mm)を用いた。この寸法では、通常の粗骨材粒度(5~20mm)を使用すると、試験片が不均質となるため、独自の粒度の碎石(2~12.5mm)および砕砂(0.15~2mm)を作製し、それぞれ骨材に用いた。コンクリートの基本配合の条件は、表3に示すように、単位水量 $W=195\text{kg/m}^3$ とし、水セメント比 $W/C=50\%$ 、細骨材率 $s/a=0.4$ とし、エントラップトエア1%を仮定して作製した。また、コンクリートの練混ぜは、手練りとした。

作製したコンクリート試験片は、1日間、型枠内で養生した。養生後、脱型したときの寸法をマイクロメータで測定し、これを基準長さとした。試験片は、乾燥剤によって湿度 $50 \pm 5\%$ に保ったデシケーター内で乾燥させ、定期的に収縮量をマイクロメータで測定した。測定は、収縮が止まるまで、1ヶ月以上おこなった。

表1 粗骨材原石の基礎物性値

粗骨材	比重	吸水率(%)	乾燥収縮率(μ)
硬質砂岩	2.70	2.2	46
安山岩A	2.61	1.8	214
安山岩B	2.57	3.3	334

表2 細骨材の基礎物性値

細骨材	比重	吸水率(%)	平均粒度(mm)
天然砂a	2.60	3.30	0.96
天然砂b	2.53	2.15	0.84
天然砂c	2.58	2.60	0.88
各粗骨材の砕砂	(表1)	(表1)	0.82

表3 コンクリート試験片の基本配合条件

s/a (%)	W/C (%)	単位水量(kg/m ³)	空気量(%)	セメントペースト率
40	50	195	1	0.328

表4 粗骨材と細骨材の原石が異なる試験片

粗骨材	細骨材	全骨材の乾燥収縮率 (μ)
硬質砂岩	安山岩B	168
安山岩B	硬質砂岩	228
硬質砂岩	硬質砂岩	46
安山岩B	安山岩B	334
安山岩A	安山岩A	214

表6 天然砂と砕砂の比較用試験片

粗骨材	細骨材			
	天然砂	砕砂		
硬質砂岩	a	b	c	硬質砂岩
安山岩A	a	b	c	安山岩A
安山岩B	a	b	c	安山岩B

表5 天然砂の粒度が異なる試験片

粗骨材	天然砂a粒度 (mm)
硬質砂岩	0.96
硬質砂岩	0.58
安山岩A	0.96
安山岩A	0.58

表7 セメントペースト率が異なる試験片

粗骨材	細骨材	水セメント比 (%)	単位水量 (kg/m ³)	セメントペースト率
安山岩A	天然砂b	50	195	0.32
安山岩A	天然砂b	50	250	0.41
安山岩A	天然砂b	50	300	0.49
安山岩A	天然砂b	50	350	0.57

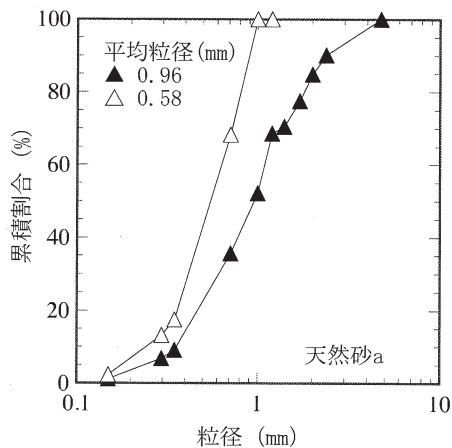


図1 天然砂aの粒度分布

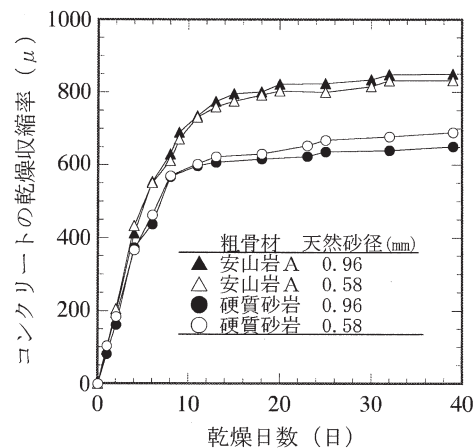


図2 乾燥収縮率が異なる粗骨材と細骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮の挙動

3. 3 実験条件

(1) 粗骨材と細骨材の影響の差

粗骨材と細骨材が、コンクリートの乾燥収縮率に及ぼす影響の差について調べるため、表4に示すように、乾燥収縮率が最も小さい硬質砂岩と、最も大きい安山岩Bを、それぞれ粗骨材と細骨材、さらにその逆の組合せにし、コンクリートを作製した。また、同一原石を、それぞれ粗骨材および細骨材とするコンクリートを作製した。これらコンクリートの乾燥収縮率と全骨材の平均乾燥収縮率との関係から、粗骨材および細骨材の影響の違いを比較検討した。

(2) 細骨材の粒度の影響

細骨材の粒度の影響を調べるため、天然砂aを篩い分け、平均粒度を0.96および0.58mmとした天然砂を用意した。表5および図1に示すように、細骨材に平均粒度が0.96mmおよび0.58mmの天然砂aと粗骨材に硬質砂岩および安山岩Aをそれぞれ用い、

コンクリート試験片を作製し、乾燥収縮率を測定した。

(3) 天然砂の産地の影響および砕砂との比較

天然砂の影響を調べるため、表6に示す骨材の配合条件でコンクリート試験片を作製した。細骨材には、平均粒度が同程度(0.82~0.96mm)で、産地の異なる3種の天然砂a、bおよびcと、粗骨材には、乾燥収縮率が異なる3つの岩種を用いた。コンクリート試験片は、1つの粗骨材について、それぞれ3つの天然砂と、比較のために、粗骨材と同岩種の砕砂を用いて、それぞれ作製し、乾燥収縮率を測定した。

(4) コンクリート内のセメントペーストの乾燥収縮率の影響

天然砂が、コンクリート内のセメントペーストにおよぼす影響を調べるため、粗骨材に安山岩Aおよび細骨材に天然砂bを用い、表7に示すように

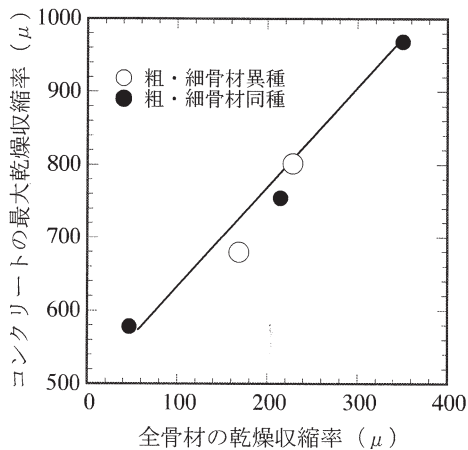


図3 粗骨材および細骨材がコンクリートの乾燥収縮率に及ぼす影響

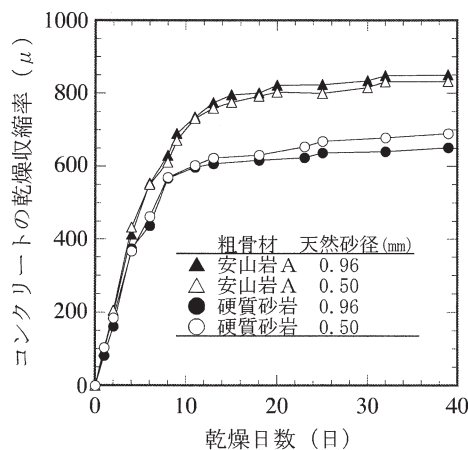


図4 天然砂の粒度がコンクリートの乾燥収縮率に及ぼす影響

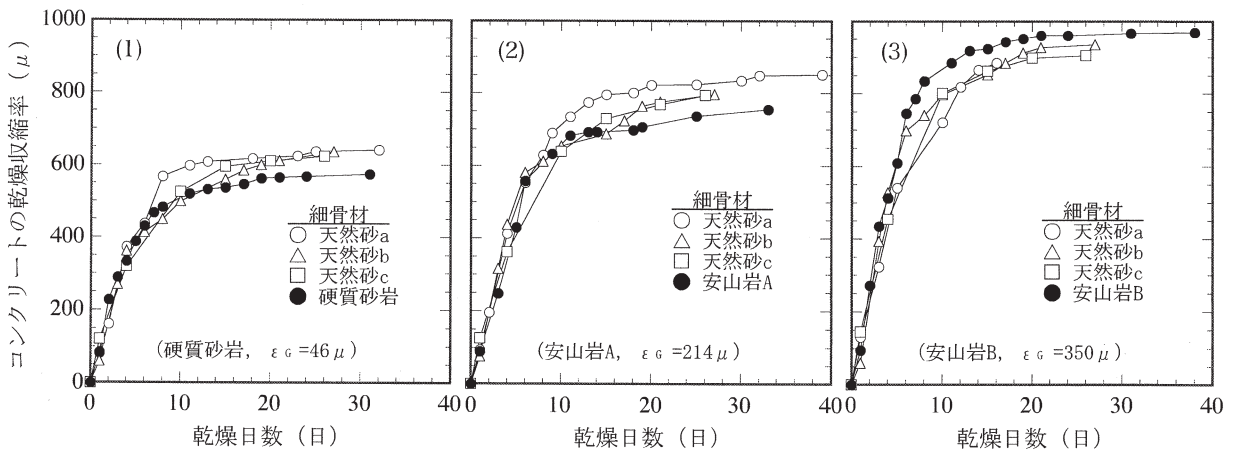


図5 細骨材に異なる天然砂を用いたコンクリートの乾燥収縮挙動

水セメント比 W/C を50%で一定とし、単位水量 W を調整して、セメントペースト率を0.32~0.57まで変化させた、4つのコンクリート試験片を作製した。これらの乾燥収縮率の測定結果から、セメントペーストの乾燥収縮率を式(1)を用いて算定し、碎石を用いた場合¹⁷⁾との違いについて比較検討した。

4. 実験結果

4. 1 粗骨材と細骨材の影響の差

図2に、粗骨材と細骨材の乾燥収縮率が異なるコンクリート試験片と、同一岩石の骨材で作製されたコンクリート試験片の乾燥収縮挙動を示す。図より、コンクリートの乾燥収縮率は、全骨材の平均乾燥収縮率が大きくなるにしたがい増加する傾向にあり、粗骨材とは異なる乾燥収縮率の細骨材を用いた場合も、傾向は同じであることがわかる。図3に全骨材の平均乾燥収縮率とコンクリートの最大乾燥収縮率との関係を示す。図より、コ

ンクリートの乾燥収縮率は、骨材の平均乾燥収縮率に比例して増加する傾向にあり、乾燥収縮率が異なる粗骨材と細骨材との組合せの試験片も、その傾向は変わらない。すなわち、岩石の乾燥収縮率は、粒度が異なっても余り変化せず、粗骨材と細骨材の影響は同程度であることがわかった。したがって、全骨材の平均乾燥収縮率は、式(2)に示すような、単純平均値として算定することが可能であると考えられる。

以上の結果および2.1節の仮説より、岩石の乾燥収縮率は、亀裂等の構造より、粘土鉱物の含有率の影響が支配的であると推察される。

4. 2 細骨材の粒度の影響

次に、細骨材としての天然砂の粒度が、コンクリートの乾燥収縮率に及ぼす影響について、図4に示す。図より、粗骨材の岩種にかかわらず、コンクリートの乾燥収縮に対して、天然砂の粒度の影響は見られず、コンクリートの乾燥収縮率は、粗骨材ごとにほぼ一致している。このことから、細

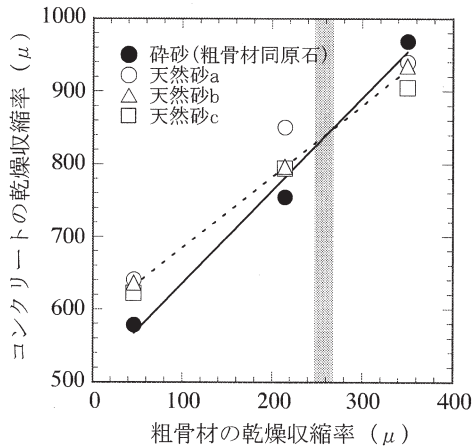


図6 コンクリートの乾燥収縮率に及ぼす天然砂の影響

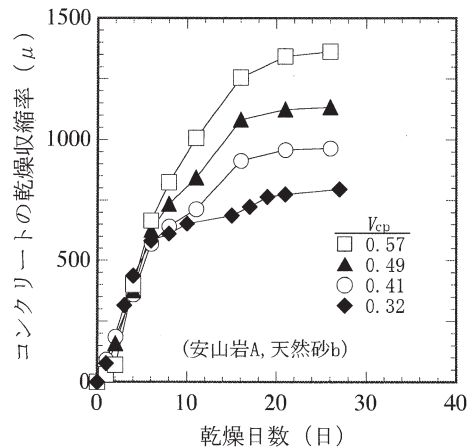


図7 セメントペースト率が異なるコンクリートの乾燥収縮挙動

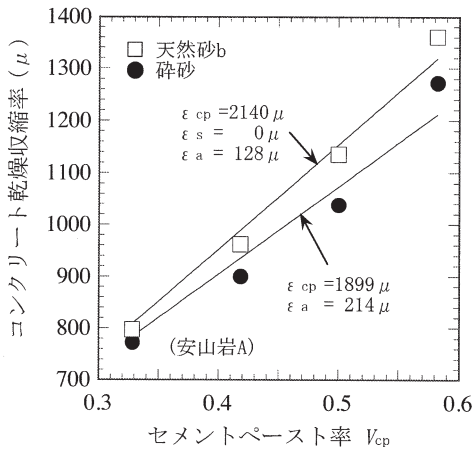


図8 天然砂を用いた場合のセメントペーストの乾燥収縮率の算定

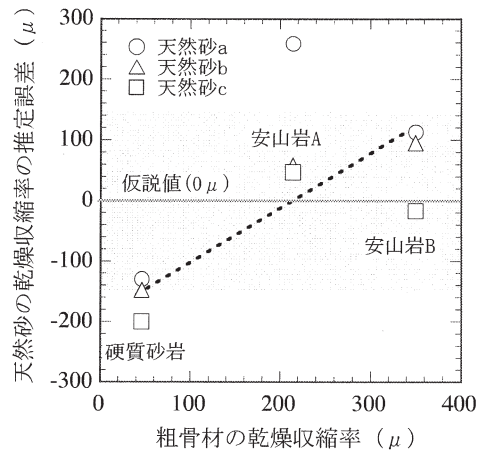


図9 天然砂の乾燥収縮率に関する推定誤差

骨材の粒度は、コンクリートの乾燥収縮にあまり影響を与えないことがわかった。

したがって、コンクリートの乾燥収縮率は、細骨材の粒度にも影響を受けず、全骨材の平均乾燥収縮率にのみ影響されることがわかった。ただし、コンクリートの流動性を考慮する場合は、粗粒の細骨材の方が、単位水量を下げることで、コンクリートの乾燥収縮率を低減できる良い骨材といえる。

4. 3 天然砂の産地の影響および砕砂との比較

図5(1)～(3)に、同じ粗骨材ごとのコンクリートの乾燥収縮挙動に対する天然砂の影響を示す。図より、どの岩種の粗骨材においても、天然砂a、b、cの違いは小さく、産地の影響は少ないことがわかった。また、粗骨材の乾燥収縮率が比較的小さい硬質砂岩と安山岩Aを用いたコンクリートでは、砕砂より天然砂の方が乾燥収縮率が大きく、安山岩Bでは、天然砂の方が小さい値を示すこと

がわかった。この結果をまとめて図6に示す。図より、天然砂の影響は、粗骨材の乾燥収縮率が約260 μより小さい領域では増加に働き、これより大きい領域では減少に働くことがわかった。この結果から、天然砂の乾燥収縮率は比較的大きく、みかけ上、260 μ程度と推定される。

しかし、鉱物学的には、天然砂の乾燥収縮率を260 μと大きな値に仮定する根拠は薄い。よって、天然砂を使用すると、砕砂よりコンクリートの乾燥収縮率が大きくなるメカニズムについて、新たに検討する必要がある。

4. 4 コンクリート内のセメントペーストの乾燥収縮率の影響

次に、天然砂を使用した場合の、コンクリート中のセメントペーストの乾燥収縮率を求めた。図7にセメントペースト率が異なるコンクリートの乾燥収縮挙動を示す。図より、セメントペースト率が大きくなるにしたがい、コンクリートの乾燥収

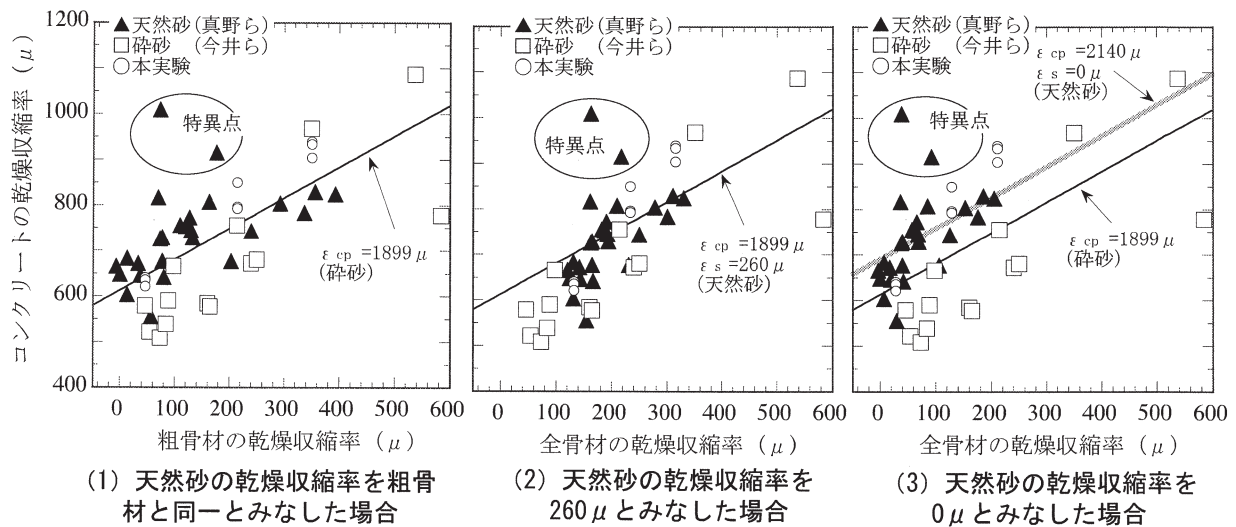


図10 コンクリートの乾燥収縮率に及ぼす天然砂の乾燥収縮率の影響¹⁾⁵⁾⁶⁾

縮率は大きくなり、セメントペースト率が最も重要な要因の1つであることがわかる。これらの結果をまとめたものを図8に示す。図中には、安山岩Aの砕砂を用いたコンクリートの実験結果も示した。また、図中のデータを式(1)で近似した直線も示した。式(1)では、直線の傾き(データの増加割合)は、セメントペーストの乾燥収縮率 ε_{cp} を表すことから、砕砂に比較し、近似直線の傾きの大きい天然砂は、 ε_{cp} が大きいと推定される。

天然砂の乾燥収縮率について、これまで測定例はほとんど無いが、砂の多くの鉱物粒子を石英とするなら、ほとんど乾燥収縮しないと考えられる。よって、砂の乾燥収縮率 $\varepsilon_s=0\mu$ と仮定し、式(1)を用いて ε_{cp} を算定した。その結果、 $\varepsilon_{cp}=2140\mu$ となり、砕砂を用いた場合の 1899μ より、13%程度大きい結果となった。このことから、天然砂を用いた場合、コンクリートの乾燥収縮率が増加する原因は、天然砂の乾燥収縮率が大きいためではなく、天然砂を用いることでコンクリート中のセメントペーストが収縮しやすくなるためと考えられる。ただし、その原因についてはわからない。

5. 考察

5.1 天然砂の乾燥収縮率の推定

天然砂を用いた場合について、セメントペーストの乾燥収縮率 $\varepsilon_{cp}=2140\mu$ の条件と、図6のデータおよび式(1)と式(2)から、天然砂の乾燥収縮率 ε_s を検算した。その結果を図9に示す。 ε_{cp} の算定には、既に $\varepsilon_s=0$ を仮定しているため、検算値は仮定値 0μ からの誤差と考えられる。図より、誤差は、ほぼ $0\pm 150\mu$ の範囲であるが、粗骨材の乾燥収縮

率に比例して、マイナスからプラスへ増加する傾向にある。とくに、 ε_{cp} を求めた安山岩Aでは、誤差は最も小さく、粗骨材の乾燥収縮率が安山岩Aより小さい領域でマイナス、大きい領域でプラスになっていることがわかる。このことは、粗骨材の乾燥収縮率が、 ε_{cp} に多少影響を与えることを示していると推定される。

以上の結果は、本算定式および実験データの精度を考慮すると、およそ天然砂の乾燥収縮率 $\varepsilon_s=0$ の仮説を支持していると考えられる。したがって、天然砂を用いたコンクリートの乾燥収縮率は、 $\varepsilon_{cp}=2140\mu$ および $\varepsilon_s=0$ の条件を仮定し、式(1)から求めることが可能である。

5.2 天然砂を用いたコンクリートの乾燥収縮率の推定

図10(1)~(3)は、コンクリートの乾燥収縮率について、真野らの天然砂を用いた実験結果⁶⁾と著者らの砕砂・砕石を用いた実験結果を示している¹⁾⁵⁾。両者の作製条件は幾つか異なるが、セメントペースト率は同程度であるため、比較可能である。ここで、図10(1)は、細骨材の影響を無視し、粗骨材の乾燥収縮率とコンクリートの乾燥収縮率との関係を示したものである。図中の直線は、 $\varepsilon_{cp}=1899\mu$ としたときの式(1)である。図より、コンクリートの乾燥収縮率は、天然砂を用いた場合、砕石に比較し、粗骨材の乾燥収縮率が小さい領域では大きく、大きい領域では小さくなる傾向にある。両者が逆転する領域は、およそ粗骨材の乾燥収縮率が $200\sim 300\mu$ のあたりである。

図10(2)は、図10(1)の真野らのデータに対し、天然砂の乾燥収縮率を 260μ (図6)と仮定し、細骨

材率を0.479として、全骨材の平均乾燥収縮率を算定し、この値を用いて図10(1)を修正した結果である。図より、コンクリートの乾燥収縮率は、天然砂あるいは砕砂の使用に関わらず、ほぼ一致し、 $\varepsilon_{cp}=1899\mu$ とした式(1)も、およそ傾向に対応していることがわかる。このことから、見かけ上、天然砂の乾燥収縮率を 260μ と仮定し、全骨材の平均乾燥収縮率を評価しても、技術的には問題ないと思われる。

図10(3)は、図10(1)の真野らのデータに対し、天然砂の乾燥収縮率を 0μ (図9)と仮定し、図10(2)と同様に示したものである。図より、天然砂を用いたコンクリートの乾燥収縮率は、砕砂に比較し、ほとんどの領域で大きくなっていることがわかる。これら天然砂のデータに対しては、 $\varepsilon_{cp}=2140\mu$ とした式(1)が良く対応していることから、この結果は、著者らが仮定したメカニズムの妥当性を実証していると思われる。

6. まとめ

本研究では、コンクリートの乾燥収縮率に対して、同一配合条件における、天然砂と砕砂の影響について明らかとした。具体的には、コンクリートの乾燥収縮率に関して、粗骨材と細骨材の影響の比較、細骨材の粒度の影響、天然砂の産地の影響、天然砂と砕砂の影響の比較等をおこなった。

本研究結果をまとめると、以下のようである。

(1) コンクリートの乾燥収縮率に及ぼす影響に関し、粗骨材と細骨材の影響は同程度であり、骨材の寸法によって乾燥収縮率は変化しない。

(2) 細骨材の粒度は、コンクリートの乾燥収縮率に影響しない。

(3) 天然砂の産地の違いによって、コンクリートの乾燥収縮率はあまり変化せず、ほぼ一定である。

(4) 同一の配合条件において、コンクリートの乾燥収縮率は、砕砂を用いた場合に比較し、天然砂を用いた場合、粗骨材の乾燥収縮率が 260μ 以下の領域で大きく、これ以上の領域で小さくなる。

(5) 天然砂は、乾燥収縮率 260μ の砕砂と同程度の影響を及ぼす。

(6) 天然砂を使用した場合、砕砂に比較し、コンクリート中のセメントペーストの乾燥収縮率が大きくなる。

以上の知見は、本実験精度の範囲内で導いた知見であり、実験精度の向上によっては、メカニズムの詳細等が異なることも考えられる。

引用文献

- 1) 今井忠男、平澤祐介、片柳成章、杉本文男(2009)：コンクリート用骨材における乾燥収縮ひずみの許容値について、資源・素材2009(札幌)講演資料、pp. 271-274.
- 2) 立松和彦、荒井正直、岩清水隆、木村芳幹、浦野英男、今本啓一、元木亮：関西地域における骨材原石の乾燥収縮および細孔分布に関する実験的研究、日本建築学会構造系論文集、第549号、pp. 1-6, 2001.
- 3) 古城謙二(2011)：砕石の品質がコンクリート品質へ与える影響、砕石フォーラム2011資料、pp. 83-86.
- 4) 日本コンクリート工学協会(2010)：コンクリートの収縮問題検討委員会報告書、日本コンクリート工学協会、pp. 81-95.
- 5) 今井忠男、杉本文男(2011)：乾燥収縮率の簡便な試験法による原石の品質管理について、砕石の研究、Vol. 26, No. 1, pp. 6-15.
- 6) 真野孝次、中村則清、山本和成(2010)：砕石の品質がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響に関する実験的研究、資源・素材2010(福岡)講演資料、pp. 235-238.
- 7) 今井忠男、平澤祐介、杉本文男(2011)：コンクリートの乾燥収縮率に及ぼす配合および作製条件の影響、建設用原材料、Vol. 19, No. 1, pp. 11-18.

(2011年12月2日受付 2012年2月16日受理)