

コンクリートの乾燥収縮に及ぼす骨材特性の影響に関する調査

WG 3 主査 島 弘^{*1}

要旨：コンクリートの乾燥収縮量は骨材の特性が影響するが、予測式には骨材特性は考慮されておらず、ばらつきが大きいのが現状である。そこで、コンクリートの収縮量はセメントペーストの収縮量と骨材による拘束度によって決まり、拘束度は骨材の量、骨材自身のヤング係数および乾燥収縮量によるという影響メカニズムとそれが計算できる複合則の歴史と現状を調査した。複合則を検証するために、四国で産出される異なった岩種の碎石に対して、原石の乾燥収縮試験やヤング係数試験、コンクリートの乾燥収縮試験等を行った。その結果から、コンクリートの乾燥収縮ひずみは粗骨材の種類によって異なること、骨材自身が乾燥湿潤によって収縮膨張するが、骨材の乾燥収縮量やヤング係数は岩石の種類によって大きく異なることを確認した。骨材原石の乾燥収縮量と内部空隙比表面積との間に明確な関係は見られなかった。複合則によって骨材のヤング係数および乾燥収縮ひずみを共に考慮すると、コンクリートの乾燥収縮ひずみが精度よく予測することができる。

1. はじめに

近年、多くのコンクリート構造物において、コンクリートにひび割れが発生する事例が多くなり、問題となっている。これらのひび割れは、施工や養生の方法だけでなく、コンクリート材料自身の特性も影響する材料と施工の複合問題である。ひび割れの原因としては、部材断面が大きいものではセメントの水和熱による温度の影響もあるが、断面の薄い部材のひび割れの原因は主としてコンクリートの乾燥収縮が外部から拘束されることによるものである。これらの内の乾燥収縮によるひび割れを抑制するためには、乾燥収縮量を低減することが第一の有効な方策であると思われる。コンクリートの乾燥収縮量は、コンクリートに用いる骨材の特性によっても影響を受けると言われている。そこで、本研究は、骨材特性がコンクリートの乾燥収縮に影響を及ぼすメカニズムを調査し、骨材特性の影響を取り入れた乾燥収縮量予測手法を検討することを目的とする。

2. 技術の現状

2.1 コンクリートの乾燥収縮の現状

乾燥収縮量の全国的な試験結果として、1979年の乾燥収縮ひずみは平均672 μ であったが、1990年代後半では平均774 μ であった。すなわち、約20年間で乾燥収縮ひずみが100 μ 程度も大きくなっている。図2.1.1は、最近の全国の生コン工場におけるコンクリートの乾燥収縮ひずみの測定結果の例である¹⁾。乾燥収縮ひずみが悪影響を及ぼすと言われている800 μ を超える割合は1/4以上となっている。

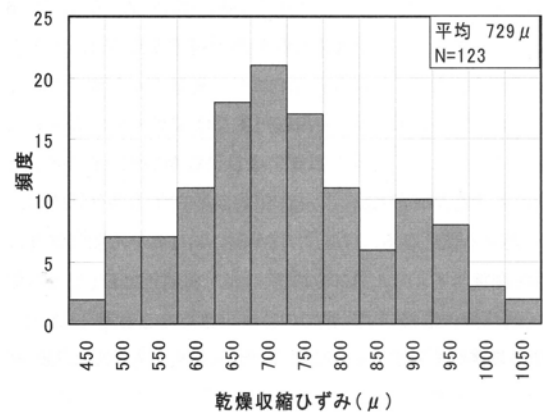


図 2.1.1 コンクリートの乾燥収縮調査例¹⁾

2.2 乾燥収縮予測式の現状

コンクリートの収縮に及ぼす要因は多様であり、精度の良い予測式がないのが現状である。コンクリートの乾燥収縮ひずみに骨材の特性が影響を及ぼすことは1900年代初頭から言われている²⁾。しかし、土木学会³⁾および建築学会⁴⁾においても、予測式に骨材特性の影響は考慮されていない。ただし、建築学会収縮ひび割れ制御指針(案)の付録2.1.4に細骨材および粗骨材の特性が別々に考慮できる予測式が示されている。

3. 骨材特性がコンクリートの乾燥収縮に影響を及ぼすメカニズム

3.1 コンクリート乾燥収縮の原因

乾燥収縮は物体が乾燥することによって長さあるいは体積が減少することである。コンクリートの材料は水、セメントおよび骨材であるが、水とセメントは反応して

*1 高知工科大学 工学部社会システム工学科 工博 (正会員)

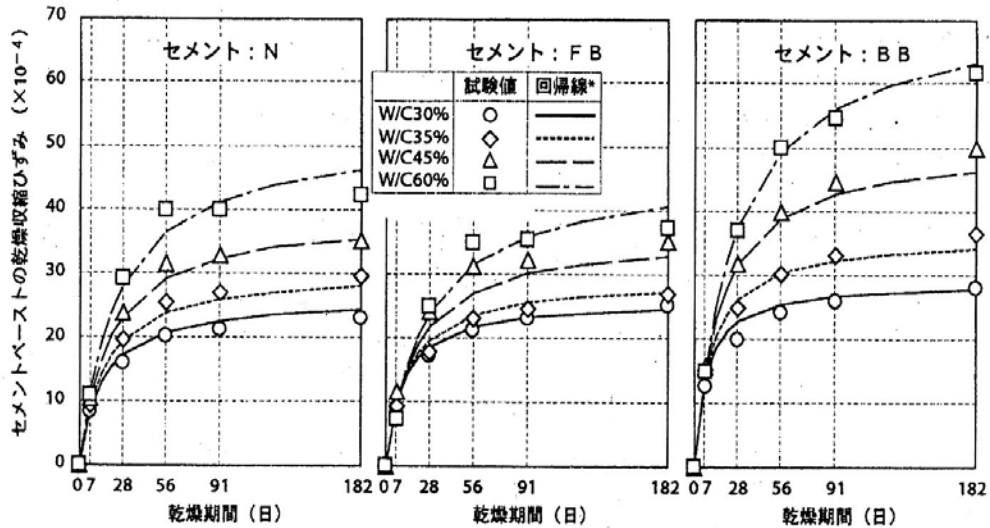


図 3.2.1 セメントペーストの乾燥収縮ひずみ (江口ら, 2002) ⁶⁾

別の特性を持つセメントペースト硬化体となるため、硬化後のコンクリートはセメントペースト硬化体と骨材の複合体と考えることができる。コンクリートの乾燥収縮は構成材料であるセメントペースト硬化体の乾燥収縮が原因ということになる。

3.2 セメントペースト硬化体の乾燥収縮

セメントペースト硬化体の乾燥収縮は、骨材との複合体であるコンクリートのものよりもはるかに大きく、ひずみで 5000 μ 以上となることも稀でない。セメントペースト硬化体は水和生成物とその周辺の水から成るが、水和生成物の微視的構造とそこに存在する水の形態は複雑であり、収縮の発生機構には不明な点が多いが、セメントペースト硬化体における水分の移動に伴う乾燥収縮の発生機構の説として、

- 1) 毛細管張力説 (Capillary tension)
- 2) 分離圧説 (Disjoining pressure)
- 3) 表面張力説 (Surface tension of solid)
- 4) 層間水移動説 (Loss of interlayer water)

などが提示されている⁵⁾。

セメントペースト硬化体の乾燥収縮ひずみに最も大きく影響を及ぼす材料的要因はセメントの種類と水セ

メント比である。江口らによるセメントペースト硬化体の乾燥収縮の実験結果を図 3.2.1 に示す⁶⁾。

3.3 コンクリート収縮に対する骨材の影響

(1) 骨材効果の種類

コンクリートの乾燥収縮ひずみが複雑となるのは、それが骨材とセメントペースト硬化体の複合則に支配されることによる。すなわち、コンクリートの乾燥収縮はセメントペーストの水セメント比の影響のほか、骨材の影響が大きい。骨材の存在は、乾燥速度を遅らせたりするが、この影響は二次的であり、基本的にはセメントペースト硬化体の乾燥収縮を抑制する効果である。この効果は二つの要素からなっている。ひとつはセメントペースト硬化体の乾燥収縮ひずみを「うすめる」ことであり、もう一つは、セメントペースト硬化体の収縮に対して骨材が圧縮応力を負担して収縮に抵抗することである。

(2) 単位骨材容積の影響

コンクリート中の骨材容積が大きくなると収縮の原因であるセメントペースト硬化体の容積が小さくなり、収縮を「うすめる」効果となる。この効果は、コンクリートを図 3.3.1(a) のようにモデル化 (直列モデル) した

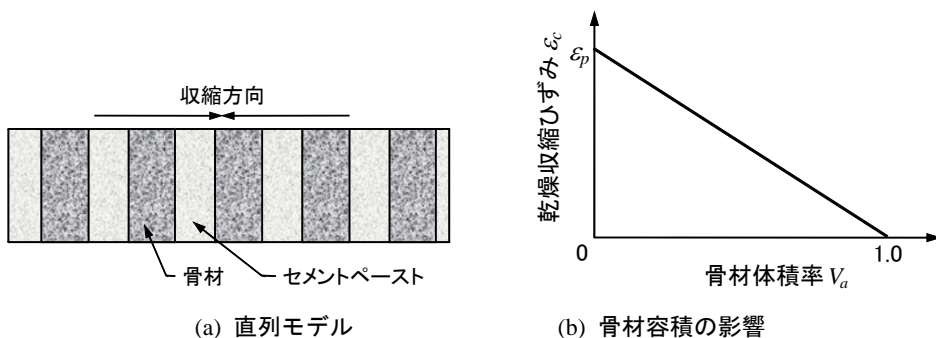


図 3.3.1 骨材容積の影響 (直列複合則)

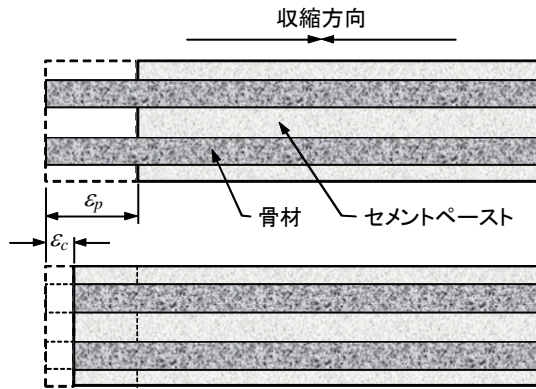


図 3.3.2 並列複合則

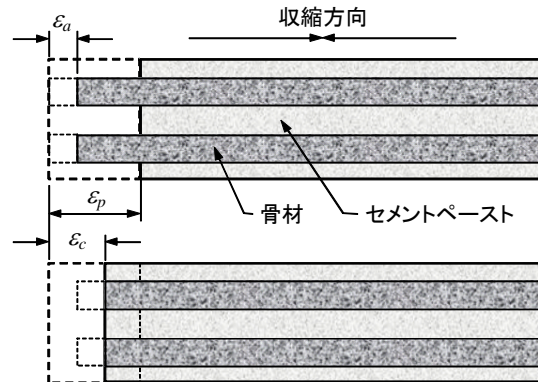


図 3.3.4 骨材の収縮を考えた並列複合則

場合、次式のように骨材が体積を占める量による（図 3.3.1(b)）。

$$\frac{\epsilon_c}{\epsilon_p} = 1 - V_a \quad (3.1)$$

ここで、 ϵ_c ：コンクリートの収縮ひずみ

ϵ_p ：セメントペースト硬化体の非拘束収縮ひずみ

V_a ：骨材の単位容積率

である。

(3) 骨材特性の影響

骨材の種類によってコンクリートの乾燥収縮の大きさが異なることは古くから言われている²⁾。

(4) 骨材ヤング係数の影響

セメントペースト硬化体の収縮に対して骨材が圧縮応力を負担して収縮に抵抗する効果は、骨材の量と剛性によって支配される。図 3.3.2 は、骨材のひずみはコンクリートのひずみに等しいと仮定したモデル（並列複合則）である。このモデルにおける力の釣合いから次式が得られる。左辺が骨材の圧縮抵抗力であり、右辺がセメントペーストに作用する引張力である。

$$E_a \epsilon_c V_a = E_p (\epsilon_p - \epsilon_c) (1 - V_a) \quad (3.2)$$

上の式を整理すると、骨材の効果は次式で表される。

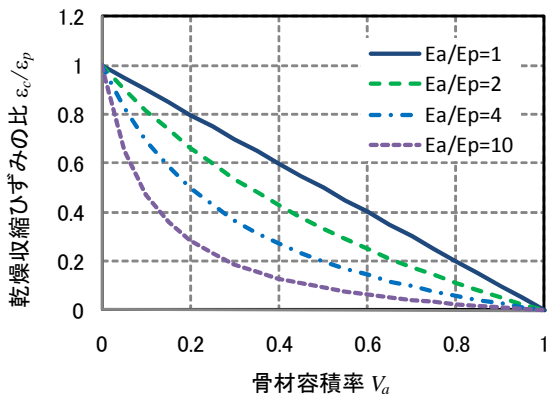


図 3.3.3 骨材のヤング係数の影響

$$\frac{\epsilon_c}{\epsilon_p} = \frac{1 - V_a}{1 + (E_a / E_p - 1) V_a} \quad (3.3)$$

ここで、 E_a ：骨材のヤング係数

E_p ：セメントペースト硬化体のヤング係数

である。上の式を図にしたものが図 3.3.3 である。骨材のヤング係数が大きくなるほどコンクリートの乾燥収縮ひずみが小さくなること分かる。

(5) 骨材の乾燥収縮の影響

次に、骨材の乾燥収縮を取り入れた並列複合則を図 3.3.4 に示す。骨材の圧縮力とセメントペーストの引張力との釣合いは次式のようになる。

$$E_a (\epsilon_c - \epsilon_a) V_a = E_p (\epsilon_p - \epsilon_c) (1 - V_a) \quad (3.4)$$

ここで、 ϵ_a ：骨材の乾燥収縮ひずみである。この式を骨材の効果を表すように整理すると、次式のようになる。

$$\frac{\epsilon_c}{\epsilon_p} = \frac{1 + \left(\frac{\epsilon_a}{\epsilon_p} \frac{E_a}{E_p} - 1 \right) V_a}{1 + \left(\frac{E_a}{E_p} - 1 \right) V_a} \quad (3.5)$$

この考え方が1953年に大野⁷⁾によって提案されたものである。

3.4 球殻モデル

(1) ひずみ拘束モデル

現実のコンクリートは球状の骨材がその周りの球殻状のコンクリートの収縮を拘束するものであり、上述の直列複合モデルも並列複合モデルも現実とは離れている。1956年、G. Pickett⁸⁾は図 3.4.1 に示すような球殻モデルを用いて、次のような式を提案している。

$$\frac{\epsilon_c}{\epsilon_p} = (1 - V_a)^\alpha + \frac{\epsilon_a}{\epsilon_p} \quad (3.6)$$

$$\text{ここで、} \alpha = \frac{3(1 - \mu_c)}{1 + \mu_c + 2(1 - 2\mu_a) E_c / E_a} \quad (3.7)$$



図 3.4.1 Pickett のモデル⁸⁾

μ_a, μ_c : それぞれ骨材およびコンクリートのポアソン比である。

(2) 毛細管張力モデル

以上のモデルでは、乾燥収縮をひずみ拘束として取り扱っており、引張力を受けるセメントペーストのクリープを考慮していない。複合モデルとしては完全に近い Pickett のモデルにおいても、コンクリートの収縮は予測値よりも小さくなるとされている。

1975 年、岸谷・馬場⁹⁾は、Pickett のモデルを発展させ、乾燥収縮ひずみを「乾燥収縮応力」による弾塑性変形と考へ、図 3.4.2 に示されるような毛細管張力モデルを用いた次の予測式を提案している。

$$\frac{\epsilon_c}{\epsilon_p} = \frac{1 - \left(1 - \frac{\epsilon_a}{\epsilon_p} \frac{E_a}{E_p}\right) V_a}{E_c / E_p} \quad (3.8)$$

これが馬場らの基礎式である。しかし、この式は E_c/E_p というコンクリートのヤング係数の項を含んでおり、完全な複合則とはなっていない。

そこで、岸谷らは、 E_c/E_p を複合モデルによる次の Hashin-Hansen 式¹⁰⁾を用いている。

$$\frac{E_c}{E_p} = \frac{\frac{E_a}{E_p} + 1 + \left(\frac{E_a}{E_p} - 1\right) V_a}{\frac{E_a}{E_p} + 1 - \left(\frac{E_a}{E_p} - 1\right) V_a} \quad (3.9)$$

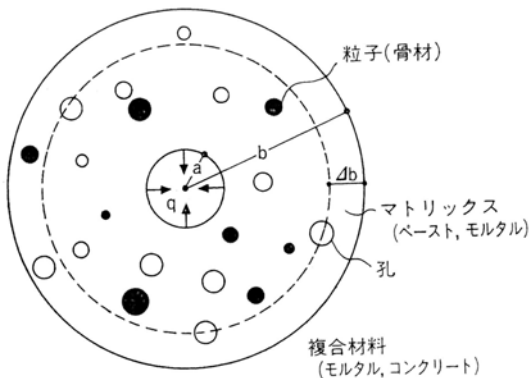


図 3.4.2 岸谷・馬場の毛細管張力モデル⁹⁾

ヤング係数比 E_c/E_p 以上の Hashin-Hansen 式を用いた場合、最終的な予測式は次のようになる。

$$\frac{\epsilon_c}{\epsilon_p} = \frac{\{1 - (1 - m \cdot n) V_a\} \{n + 1 - (n - 1) V_a\}}{n + 1 + (n - 1) V_a} \quad (3.10)$$

ここで、 $m = \epsilon_a/\epsilon_p, n = E_a/E_p$ である。これが、一般に馬場式と呼ばれるものである。

3.5 まとめ

以上のように、コンクリートをセメントペースト硬化体と骨材の複合材料とした場合、コンクリートの乾燥収縮ひずみは、次式のように、セメントペーストの乾燥収縮ひずみおよびヤング係数、骨材の乾燥収縮ひずみ、ヤング係数および単位容積の関数として表すことができる。

$$\epsilon_c = f(\epsilon_p, \epsilon_a, E_p, E_a, V_a) \quad (3.11)$$

ここで、 $\epsilon_c, \epsilon_p, \epsilon_a$: それぞれコンクリート、ペースト、骨材の乾燥収縮ひずみ

E_p, E_a : それぞれペースト、骨材のヤング係数

V_a : 骨材の単位容積

である。

4. 細骨材と粗骨材の骨材特性を考慮するコンクリートの乾燥収縮ひずみ予測方法

4.1 複合モデルのコンクリートへの適用性

上述のように、コンクリートを収縮の原因となるセメントペースト硬化体と収縮を抑制する骨材との二相複合材料とした場合には、コンクリートの乾燥収縮ひずみは、セメントペースト硬化体の乾燥収縮ひずみおよびヤング係数、骨材の乾燥収縮ひずみ、ヤング係数および単位容積の関数として表すことができる。しかし、現実のコンクリートでは、細骨材と粗骨材に別の材料を用いることも多く、さらには細骨材を海砂と陸砂の混合物とすることもあつた。したがつて、収縮の予測法を複数の材料から成る骨材に対応させなければならない。

4.2 モルタルと粗骨材の二相複合材料

江口・寺西は、馬場式を図 4.2.1 に示すように、コンクリート中のモルタル成分 (セメントペーストと細骨材の二相材料) およびコンクリート (モルタルと粗骨材の二相材料) に対応するように拡張した⁶⁾。コンクリート中のモルタル成分の収縮ひずみは下の式のようにになる。

$$\frac{\epsilon_m}{\epsilon_p} = \frac{\{1 - (1 - m_1 \cdot n_1) V_s'\} \{n_1 + 1 - (n_1 - 1) V_s'\}}{n_1 + 1 + (n_1 - 1) V_s'} \quad (4.1)$$

ここで、 $m_1 = \epsilon_s/\epsilon_p, n_1 = E_s/E_p, V_s'$: 対モルタル細骨材容積比である。対モルタル細骨材容積比は $V_s' = V_s / (1 - V_g)$ であ

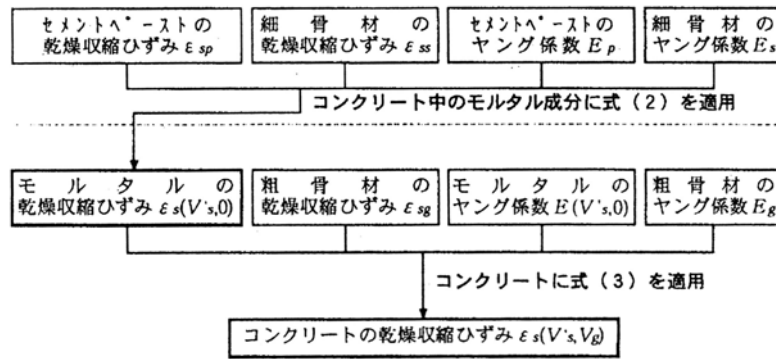


図 4.2.1 江口・寺西の予測フロー⁶⁾

るので、細骨材容積比 V_s と粗骨材容積比 V_g を用いると下のように表される。

$$\varepsilon_m = \varepsilon_p \frac{\{1 - V_g - (1 - m_1 \cdot n_1) V_s\} \{(n_1 + 1)(1 - V_g) - (n_1 - 1) V_s\}}{\{(n_1 + 1)(1 - V_g) + (n_1 - 1) V_s\} (1 - V_g)} \quad (4.2)$$

このモルタルの収縮に対するコンクリートの収縮ひずみの比は以下のように表わされる。

$$\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_m} = \frac{\{1 - (1 - m_2 \cdot n_2) V_g\} \{n_2 + 1 - (n_2 - 1) V_g\}}{n_2 + 1 + (n_2 - 1) V_g} \quad (4.3)$$

ここで、 $m_2 = \varepsilon_g / \varepsilon_m$, $n_2 = E_g / E_m$, V_g : 粗骨材単位容積比である。

4.3 三相複合材料モデル

上述の骨材を細骨材と粗骨材に分けて考えるために、モルタル成分を媒体として、二相モデルを二段階に用いる方法（図 4.3.1 の(a)）では、モルタルのヤング係数

が必要となってくる。そこで、寺西・佐藤は、図 4.3.1 の(b)に示すような、コンクリートをセメントペースト、細骨材および粗骨材から成る三相モデルを提案している¹¹⁾。モデル化の手法は、馬場らの方法を三相材料に適用するものである。すなわち、毛細管張力を Laplace-Kelvin 式で表し、毛細管張力に伴う収縮ひずみを厚肉球殻の弾性理論に基づいて解き、材料のポアソン比を 0.2 としている。この時、二相材料が対象である式(3.8)の馬場基礎式に対して、三相材料では下の式になる。

$$\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_p} = \frac{1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_p} \frac{E_s}{E_p}\right) V_s - \left(1 - \frac{\varepsilon_g}{\varepsilon_p} \frac{E_g}{E_p}\right) V_g}{E_c / E_p} \quad (4.4)$$

この式も、二相材料モデルと同様に、コンクリートのヤング係数が必要となる。馬場らは、コンクリートのヤング係数に Hashin-Hansen 式を用いているが、この式は三相材料には適用できない。そこで、寺西らは Hashin-Hansen 式の原形である Hashin の複合モデル¹²⁾を用いて、次のようなヤング係数式を提案している。

$$\frac{E_c}{E_p} = 1 + \frac{2(n_s - 1)V_s}{n_s + 1 - (n_s - 1)(V_s + V_g)} + \frac{2(n_g - 1)V_g}{n_g + 1 - (n_g - 1)(V_s + V_g)} \quad (4.5)$$

ここで、 $n_s = E_s / E_p$, $n_g = E_g / E_p$

E_s, E_g, E_p : それぞれ、細骨材、粗骨材、セメントペースト硬化体のヤング係数

V_s, V_g : それぞれ、細骨材および粗骨材の単位容積比である。

4.4 セメントペースト硬化体のヤング係数 E_p および乾燥収縮ひずみ ε_p

(1) ヤング係数

セメントペースト硬化体のヤング係数は、セメントの種類と水セメント比によって表されると言われている。例えば、T. C. Powers, et.al. (1946)は、式(4.6)を提案してい

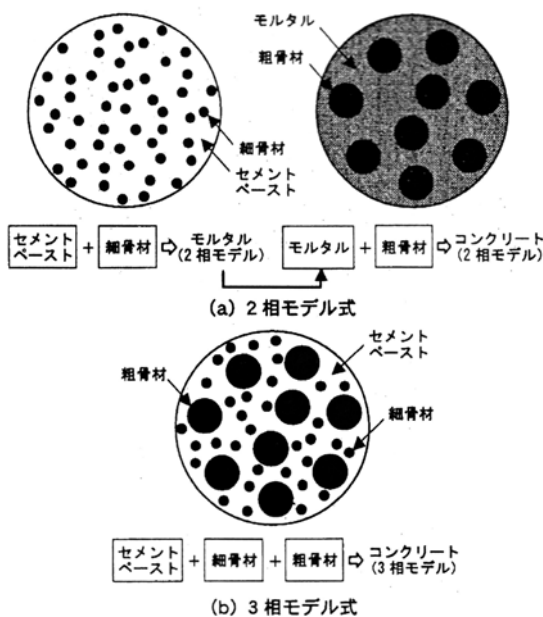


図 4.3.1 江口・寺西の二相モデルと寺西・佐藤の三相モデル¹¹⁾

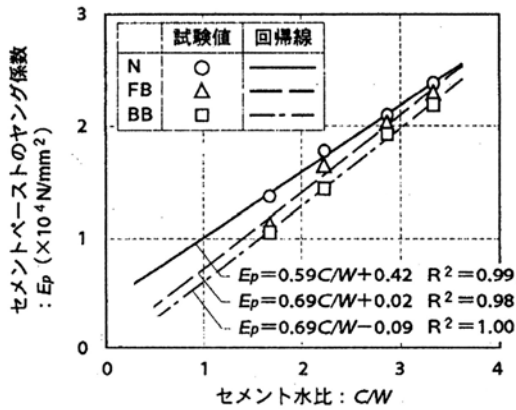


図 4.4.1 セメントペーストのヤング係数⁶⁾

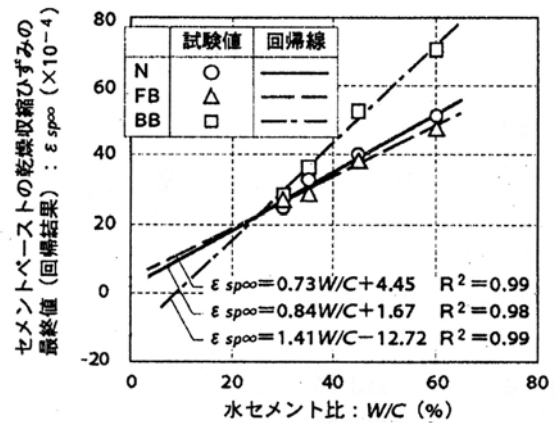


図 4.4.2 セメントペーストの最終収縮ひずみ⁶⁾

る¹³⁾。

$$E_p = 85.1 \times 10^3 \left(\frac{W/C + 0.316}{0.170\alpha + 0.316} \right)^3 \quad (\text{N/mm}^2) \quad (4.6)$$

ここで、 α はセメントの反応率である。

江口・寺西⁶⁾ は、図 4.4.1 に示すように、セメントの種類として普通ポルトランドセメント (N)、フライアッシュセメント B 種 (FB)、高炉セメント B 種 (BB) を用い、それぞれ水セメント比を 30, 35, 45, 60% の 4 水準に変えた実験を行っている。標準水中養生後の乾燥開始材齢は 7 日、乾燥環境は温度 20°C、湿度 60% である。試験体が $\phi 5 \times 10\text{cm}$ の円柱供試体を用いて乾燥材齢 28 日でヤング係数が測定され、その結果から次の式が提案されている。

$$E_p = \frac{100}{W/C} \gamma + \eta \quad (4.7)$$

ここに、 E_p : セメントペーストのヤング係数 (kN/mm²)

W/C : 水セメント比 (%)

γ, η : セメントの種類により決まる定数 (下表)

セメントの種類	γ	η
N	5.9	4.2
FB	6.9	0.2
BB	6.9	-0.9

(2) 乾燥収縮ひずみ

江口・寺西は、図 4.4.2 に示すように、同じセメントペースト実験において、寸法 $4 \times 4 \times 16\text{cm}$ の試験体を用いて乾燥収縮ひずみを測定し、回帰分析から次式を提案している。

$$\epsilon_p(t) = \frac{t}{\kappa + t} \epsilon_{ps} \quad (4.8)$$

これは、Branson (ACI-209 式) や Almudaiheem (修正 Ross 式) によるコンクリートの乾燥収縮予測式と同じ形

である。ここで、

$$\kappa = \alpha W/C + \beta \quad (4.9)$$

$$\epsilon_{ps} = \lambda W/C + \delta \quad (4.10)$$

ここに、 $\epsilon_p(t)$: セメントペーストの乾燥収縮ひずみ (μ)

t : 乾燥期間 (日)

W/C : 水セメント比 (%)

$\alpha, \beta, \lambda, \delta$: セメントの種類により決まる定数

(下表)

セメントの種類	α	β	λ	δ
N	0.322	4.77	86.3	54
FB	0.518	-4.72	67.8	581
BB	0.608	-10.77	143.7	-1408

4.5 骨材のヤング係数 E_s, E_g

砕砂や砕石で原石のヤング係数を測定できる場合には、原石のヤング係数を用いることができる。しかし、海砂や川砂などの自然砂あるいは川砂利では原石が存在しないために、ヤング係数を直接に測定することは出来ない。また、砕砂および砕石においては、原石塊を骨材粒径まで破砕する過程で骨材内部に損傷を生じさせ、骨材のヤング係数が低下することも考えられ、砕石骨材のそのもののヤング係数を確認するのが望ましい。

砕石骨材のヤング係数を推定する最も簡単な方法は、原石を同じとする砕砂、砕石を細骨材および粗骨材として用いたコンクリート試験体を作製し、そのヤング係数から複合則を用いて計算するものである。コンクリートのヤング係数 E_c は、セメントペースト硬化体のヤング係数 E_p および骨材のヤング係数 E_a から次式で表される。

$$\frac{E_c}{E_p} = \frac{\frac{E_a}{E_p} + 1 + \left(\frac{E_a}{E_p} - 1\right)V_a}{\frac{E_a}{E_p} + 1 - \left(\frac{E_a}{E_p} - 1\right)V_a} \quad (4.11)$$

この式を骨材のヤング係数 E_a の式に書き換えると、次式のようにになる。

$$E_a = -\frac{n_{cp} - 1 + (n_{cp} + 1)V_a}{n_{cp} - 1 - (n_{cp} + 1)V_a} E_p \quad (4.12)$$

ここで、 $n_{cp} = E_c/E_p$ 、 V_a ：骨材単位容積比である。

細骨材のヤング係数は、モルタル試験体を作製し、そのヤング係数を測定することによって、複合則を用いて推定することができる。モルタルのヤング係数 E_m は、セメントペースト硬化体のヤング係数 E_p および細骨材のヤング係数 E_s から次式で表される。

$$\frac{E_m}{E_p} = \frac{\frac{E_s}{E_p} + 1 + \left(\frac{E_s}{E_p} - 1\right)V_s}{\frac{E_s}{E_p} + 1 - \left(\frac{E_s}{E_p} - 1\right)V_s} \quad (4.13)$$

この式を細骨材のヤング係数 E_s の式に書き換えると、次式のようにになる。

$$E_s = -\frac{n_{mp} - 1 + (n_{mp} + 1)V_s}{n_{mp} - 1 - (n_{mp} + 1)V_s} E_p \quad (4.14)$$

ここで、 $n_{mp} = E_m/E_p$ 、 V_s ：細骨材単位容積比である。

粗骨材のヤング係数は、コンクリート試験体とそのモルタル成分試験体とを作製し、それらのヤング係数を測定することによって、複合則を用いて推定することができる。コンクリートのヤング係数 E_c は、モルタルのヤング係数 E_m および粗骨材のヤング係数 E_g から次式で表される。

$$\frac{E_c}{E_m} = \frac{\frac{E_g}{E_m} + 1 + \left(\frac{E_g}{E_m} - 1\right)V_g}{\frac{E_g}{E_m} + 1 - \left(\frac{E_g}{E_m} - 1\right)V_g} \quad (4.15)$$

この式を粗骨材のヤング係数 E_g の式に書き換えると、次式のようにになる。

$$E_g = -\frac{n_{cm} - 1 + (n_{cm} + 1)V_g}{n_{cm} - 1 - (n_{cm} + 1)V_g} E_m \quad (4.16)$$

ここで、 $n_{cm} = E_c/E_m$ 、 V_g ：粗骨材単位容積比である。

4.6 骨材の乾燥収縮ひずみ ε_s 、 ε_g

骨材自身の乾燥収縮ひずみを求めるのは、骨材のヤング係数以上に難しい。砂利や自然砂の乾燥収縮を直接測定するのは不可能であり、唯一出来ることは、原石から切り出した試験体の乾燥収縮ひずみを測定し、多くの実験結果から骨材の容易に測定できる物性値との関係を示す式を構築するくらいであろう。

古くから、骨材の乾燥収縮の程度は、骨材内部の微細空隙の分布特性と関係すると言われている。後藤・藤原は、骨材粒そのものの特性に注目し、乾湿に伴う骨材の体積変化を測定している。骨材は水中で膨張し、乾燥すれば収縮することを示し、その体積変化の値を左右する最大の因子は骨材の「内部表面積」であることを明らかにしている¹⁴⁾。それ以降、窒素ガスの吸着量を用いた BET 値と乾燥収縮ひずみとの関係の関する研究も進められているが、定式化には至っていない。

清原らは、乾燥収縮の予測において、骨材の乾燥収縮ひずみを骨材の吸水率で表した次式を用いている¹⁵⁾。

$$\varepsilon_{a\infty} = 185\mu^{1.3} \quad (4.17)$$

ここで、 $\varepsilon_{a\infty}$ ：骨材の乾燥収縮ひずみの最終値 (μ)、 μ ：骨材の吸水率 (%) である。しかし、人工軽量骨材では吸水率が大きいにも拘らず、乾燥収縮は大きくないという事実や過去の研究から、骨材の乾燥収縮ひずみを吸水率だけで表すことは出来ないことは明らかである。

5. 複合則を用いた乾燥収縮予測モデルの検証

5.1 骨材特性が異なるコンクリートの乾燥収縮

(1) 粗骨材の種類を変えたコンクリートの乾燥収縮実験

a) 材料

i) 粗骨材

粗骨材には、四国4県で製造される砕石を用いた。用いた粗骨材の特性を表 5.1.1 に示す。

ii) 細骨材

細骨材には、密度 2.68g/cm³、吸水率 0.81%、粗粒率 2.94 の石灰岩砕砂と密度 2.60 g/cm³、吸水率 2.36%、粗粒率 2.30 の海砂を容積比で 8 : 2 に混合し、粗粒率を 2.81 としたものを用いた。

iii) セメント

セメントには密度 3.15 g/cm³ の普通ポルトランドセメントを使用した。

iv) 混和剤

混和剤は AE 減水剤 (ボゾリス 78s) と AE 助剤を使用した。

b) 配合

コンクリートの配合は、モルタル成分および単位粗骨材容積を一定とし、粗骨材の種類だけを変えるものであ

表 5.1.1 粗骨材の特性

記号	密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	粗粒率	実積率 (%)
A	2.67	0.32	6.57	60.1
B	2.71	0.19	6.76	58.8
C	2.73	0.25	6.54	62.8
D	3.05	0.17	6.93	59.4
E	2.59	1.56	6.65	59.5
F	2.62	0.51	6.63	60.7
G	2.68	1.12	6.60	65.2
H	2.64	0.98		58.9
I	2.99	0.49		58.9

る。配合およびスランプ、空気量を表 5.1.2 に示す。フレッシュコンクリートの特性および圧縮強度などの結果については付録 1 に示す。

c) 試験体

試験体は、寸法 100×100×400mm の直方体である。各配合で 3 体作製した。

d) 養生条件

コンクリート打込み 1 日後に脱型し、6 日間 20℃ の水中養生を行った。材齢 7 日で乾燥を開始した。乾燥環境は、温度 20℃、湿度 60% である。

e) ひずみ測定方法

水中から取出し直後に試験体裏表の中央に間隔約 300mm でコンタクトゲージ用チップを貼り付けて間隔

を測定し、その距離を基準長とした。試験体の長さ変化を検長 300mm のコンタクトゲージで乾燥材齢 36 週までは 2 週間、それ以降は 4 週間間隔で 52 週まで測定した。

(2) 実験結果

各条件の収縮ひずみの経時変化を図 5.1.1 に示す。データは同条件 3 体の平均である。粗骨材の種類によって収縮ひずみの大きさが違っている。また、収縮は乾燥材齢 24 週頃で止まっているように見える。乾燥材齢 26 週と 52 週での収縮ひずみを比較したものを表 5.1.3 に示すが、収縮は 26 週からは進んでいないことが分かる。そこで、最終的な乾燥収縮ひずみの実験結果としては、乾燥材齢 26 週から 52 週までの 10 回の測定データを平均した表 5.1.3 の最下段に示すものとする。

乾燥収縮ひずみと粗骨材吸水率など他物性との関係

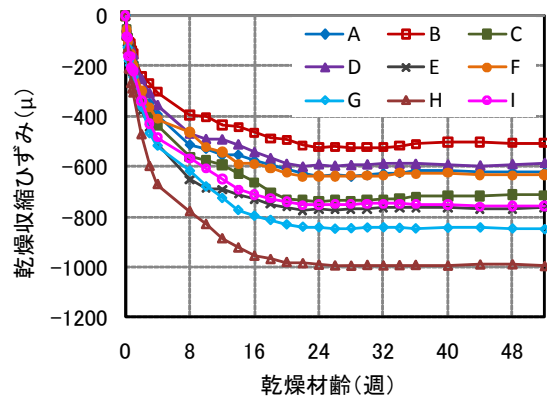


図 5.1.1 コンクリートの収縮ひずみの経時変化

表 5.1.2 コンクリートの配合

砕石の種類	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)						
					W	C	S		G	減水剤	AE 助剤
							S1	S2			
A	9.6	4.7	50.0	44.6	169	338	160	639	997	3.38	5A
B	10.7	3.8							1011		
C	13.5	4.6							1019		
D	10.4	5.1							1138		
E	12.3	5.1							967		
F	12.6	4.1							978		
G	14.5	4.3							1000		
H	12.1	4.6							985		
I	13.1	4.4							1116		

表 5.1.3 乾燥収縮ひずみ

粗骨材の種類	A	B	C	D	E	F	G	H	I
26 週のひずみ (μ)	-637	-523	-736	-595	-770	-638	-845	-993	-750
52 週のひずみ (μ)	-623	-505	-715	-591	-767	-634	-846	-992	-758
乾燥収縮ひずみ (μ)	-627	-514	-725	-592	-767	-633	-845	-993	-752

については付録2に示す。

5.2 セメントペースト硬化体のヤング係数 E_p および乾燥収縮ひずみ ε_p

(1) 実験

a) 材料

i) セメント

コンクリートと同じものを用いた。

ii) 混和剤

材料分離を防ぐためにセルロース系の増粘剤およびAE減水剤（ポゾリス78s）を使用した。

b) 配合

配合を表5.2.1に示す。

表 5.2.1 セメントペーストの配合

種類	W/C (%)	使用量 (kg)			
		W	C	減水剤	増粘剤
1	50.0	169	338	0	0
2				0	1.2g/l
3				3.38	0

c) 試験体

試験体は、直径50×高さ150mmの円柱である。各配合で6体作製した。型枠の代わりに、プレパクトのペースト試験などで用いられているビニール製のチューブを用いた。

d) 養生条件

ヤング係数を測定する圧縮試験用は、標準養生で28日養生した。乾燥収縮試験用は、打込み1日後に脱型し、6日間20℃の水中養生を行った。材齢7日で乾燥を開始した。乾燥環境は、温度20℃、湿度60%である。

e) 乾燥収縮ひずみ測定方法

水中から取出し直後に試験体裏表の中央に間隔100mmでコンタクトゲージ用チップを貼り付けて間隔を測定し、その距離を基準長とした。試験体の長さ変化を検長100mmのコンタクトゲージを用いて1週間あるいは2週間間隔で測定した。

e) 圧縮試験方法

試験体の裏表にゲージ長60mmのひずみゲージを貼り付けて圧縮試験を行った。コンクリートと同様に、最大荷重の1/3の点とひずみ50μの点を通る直線の傾きをヤング係数とした。

(2) 実験結果

a) ヤング係数

測定結果を表5.2.2に示す。平均値は13.5 kN/mm²であった。

江口・寺西の式(4.7)を用いると、本実験では、セメン

表 5.2.2 セメントペーストのヤング係数

配合	結果 (kN/mm ²)				
	1	2	3	平均	平均
2	13.8	16.5	11.9	14.1	13.5
3	12.4	12.9	13.4	12.9	

トの種類は「普通ポルトランドセメント」、W/C = 50 (%) であるから

$$E_p = \frac{100}{W/C} \gamma + \eta = \frac{100}{50} 5.9 + 4.2 = 16.0 \quad (\text{kN/mm}^2)$$

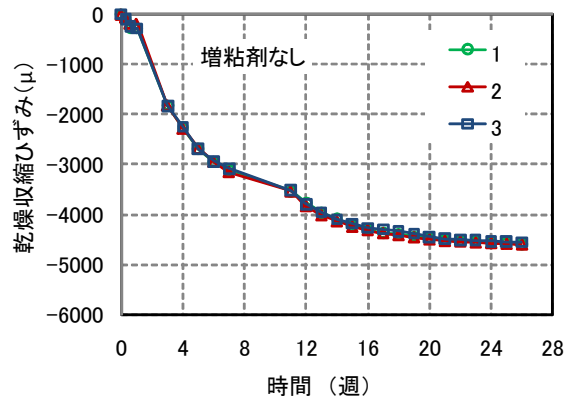
となり、実験値は式よりも約19%小さい結果となった。

b) 乾燥収縮ひずみ

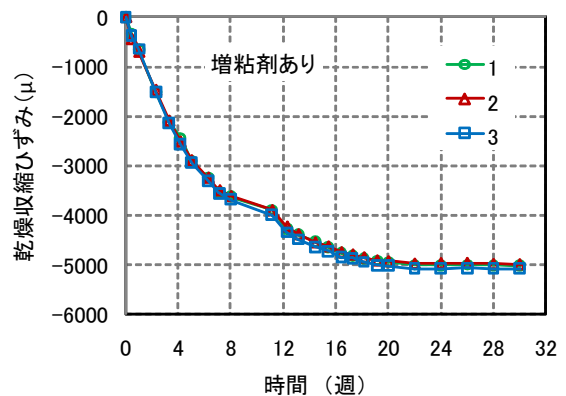
乾燥収縮ひずみの経時変化を図5.2.1に示す。乾燥収縮量は混和剤の種類によって異なっており、増粘剤なしで約4600μ、増粘剤ありで約5000μ、減水剤ありで約6000μとなっている。

江口・寺西の式(4.10)を用いると、本実験では、セメントの種類は「普通ポルトランドセメント」、W/C = 50 (%) であるから

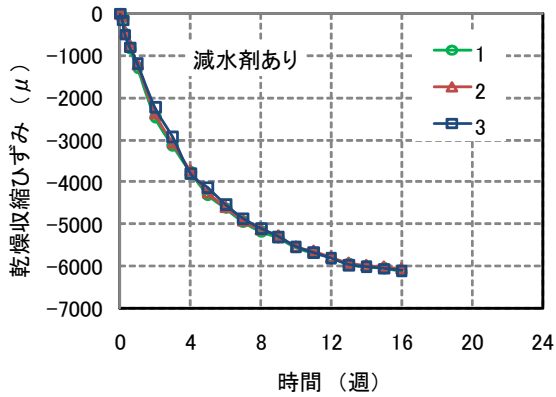
$$\varepsilon_{ps} = \lambda W/C + \delta = 86.3 \times 50 + 54 = 4370 \quad (\mu)$$



(a) 減水剤なし 増粘剤なし



(b) 減水剤なし 増粘剤あり



(c) 減水剤あり 増粘剤なし

図 5.2.1 セメントペーストの収縮ひずみの経時変化

となり、実験値は増粘剤なしで式とほぼ同じ、増粘剤ありおよび減水剤ありで式よりも大きい結果となっている。

(3) 検証用の値

モデルの検証に用いる値としては、江口・寺西の式(4.7)および(4.10)を用いる。本実験では、セメントの種類は「普通ポルトランドセメント」、 $W/C = 50 (\%)$ であるから

$$E_p = \frac{100}{W/C} \gamma + \eta = \frac{100}{50} \cdot 5.9 + 4.2 = 16.0 \quad (\text{kN/mm}^2)$$

$$\varepsilon_{p\infty} = 86.3 \times 50 + 54 = 4370 \quad (\mu)$$

となる。

5.3 骨材のヤング係数 E_s, E_g

(1) モルタルのヤング係数試験

細骨材のヤング係数を複合則を用いて推定する場合を検討するために、コンクリートから粗骨材を除いたモルタル成分硬化体のヤング係数を測定した。

a) 材料

i) 細骨材およびセメント

コンクリートと同じものを用いた。

ii) 混和剤

材料分離を防ぐために、セルロース系の増粘剤を使用した。

b) 配合

配合を表 5.3.1 に示す。

c) 試験体

表 5.3.1 モルタル成分の配合

W/C (%)	使用量 (kg)					
	W	C	石灰石 砕砂	海砂	減水剤	増粘剤
50.0	169	338	639	160	0	1.2g/l

試験体は、直径 100×高さ 200mm の円柱である。3体作製した。

d) 養生条件

標準養生で 28 日養生した。

e) 試験方法

検長 100mm のコンプレッソメータを用いてひずみを測定した。コンクリートと同様に、最大荷重の 1/3 の点とひずみ 50μ の点を通る直線の傾きをヤング係数とした。

f) 実験結果

測定結果を表 5.3.2 に示す。平均値は 34.2 kN/mm²であった。

表 5.3.2 モルタルのヤング係数

回	結果 (kN/mm ²)				
	1	2	3	平均	平均
1	31.0	37.1	34.8	34.3	34.2
2	-	36.0	32.4	34.2	

g) 複合則による推定

実験で用いたコンクリート中のモルタル成分（粗骨材 B の細砂 8 : 海砂 2）のヤング係数の実験結果（34.2 kN/mm²）から、セメントペーストのヤング係数の実測値は 13.5 kN/mm²（計算値は 16.0 kN/mm²）であるから、式(4.14)を用いると、

$$V_s = 0.519 \quad (\text{配合から計算})$$

$$E_p = 13.5 \text{ kN/mm}^2 \quad (\text{実測値})$$

$$E_p = 16.0 \text{ kN/mm}^2 \quad (\text{W/C=50.0\%からの計算値})$$

$$E_m = 34.2 \text{ kN/mm}^2 \quad (\text{実測値})$$

を式(4.14)に代入すると、細骨材のヤング係数は、

$$E_s = 147 \text{ kN/mm}^2 \quad (E_p : \text{実測値})$$

$$E_s = 90.2 \text{ kN/mm}^2 \quad (E_p : \text{計算値})$$

となる。粗骨材 B の原石のヤング係数の実測値は、90.3 kN/mm²であるから、セメントペーストのヤング係数に計算値を用いた時の推定値は、粗骨材 B の実測値とほぼ同じ値を与える結果となった。

検証における細骨材のヤング係数としては、複合則による推定値である 90.2 kN/mm²を用いる。

(2) 粗骨材原石のヤング係数試験

a) 試験体

試験体は、乾燥収縮試験に用いた原石から切り出した角柱である。各種の粗骨材に対して、それぞれ 3 体である。

b) 試験方法

ゲージ長 60mm のひずみゲージを用いてひずみを測定した。荷重はひずみが約 1000μ となるまで載荷し、除荷

表 5.3.3 粗骨材原石のヤング係数

粗骨材の種類	A	B	C	D	E	F	G	H	I
ヤング係数 (kN/mm ²)	67.6	90.3	82.1	93.7	28.6	61.6	51.0	20.8	91.8

表 5.3.4 ヤング係数 (kN/mm²) の比較

粗骨材の種類	A	B	C	D	E	F	G	H	I
コンクリート	34.2	36.4	34.6	37.6	28.3	19.8	33.6	28.7	33.6
モルタル	34.2	34.2	34.2	34.2	34.2	34.2	34.2	34.2	34.2
複合則による推定値	34.3	40.3	35.3	44.0	20.5	23.6	32.6	21.2	32.6
原石の実測値	67.6	90.3	82.1	93.7	28.6	61.6	51.0	20.8	91.8

した。応力ひずみ関係は、載荷時および除荷時ではほぼ同じ傾きの直線となるので、ヤング係数はその直線の傾きとした。

c) ヤング係数

粗骨材のヤング係数として、それぞれの原石の測定値を用いた。検証に用いた粗骨材のヤング係数を表 5.3.3 に示す。

(3) 推定方法の検証

本実験でのコンクリートのヤング係数、モルタル成分のヤング係数、それらを用いて式(4.16)（モルタル+粗骨材）で求めた粗骨材ヤング係数の推定値および粗骨材原石のヤング係数の実測値を表 5.3.4 および図 5.3.1 に示す。複合則を用いた粗骨材ヤング係数の推定値は、原石の実測値よりも小さい値を与える結果となっている。

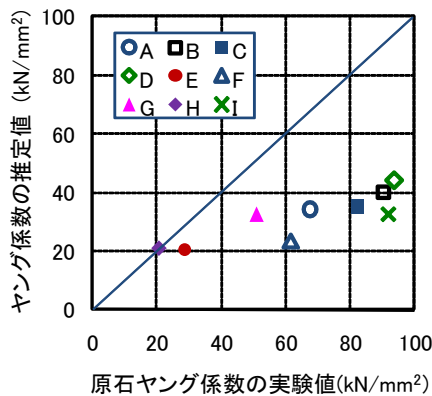


図 5.3.1 粗骨材ヤング係数の推定値と原石ヤング係数の実測値との比較

5.4 骨材の乾燥収縮ひずみ ϵ_s , ϵ_g

(1) 粗骨材原石の水中浸漬・乾燥実験

a) 試験体

粗骨材の母岩に対して収縮膨張試験を行った。試験体は、原石塊から角柱を切り出したものである。寸法は、長さが 200mm 程度であり、断面は 40×40mm から 100×100mm とし、一条件あたり 3 本を用いた。

b) 測定項目と測定方法

測長 100mm、精度 1/1000mm のコンタクトストレインゲージを用いて長さ変化を測定し、ひずみに換算した。コンタクトチップは、各試験体の裏表の中央に 100mm を評点間距離として貼り付けた。各測定時に一測点を 2 度測定した。

精度 0.1g の電子はかりを用いて、試験体の質量変化を測定した。

c) 乾燥膨張履歴

試験体の水中浸漬・乾燥の履歴を図 5.4.1 に示す。試験体を 3 週間水に浸漬した後、12 週間乾燥させながら収縮ひずみを計測した。さらに再び 5 週間水に浸漬した後、23 週間乾燥させながら計測した。次に、吸水膨張時のひずみ変化を見るために、6 週間水に浸漬した試験体を計測時にだけ取り出してひずみを計測した。その後、乾燥を開始し、6 週間乾燥時のひずみを計測した。なお、骨材 A,C および F は、乾燥期間 11 週の後、水中浸漬である。

乾燥時の環境は、温度 20℃、湿度 60%の恒温恒湿である。

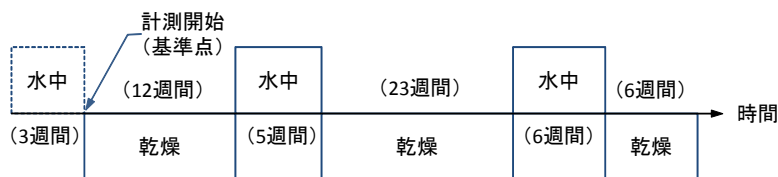


図 5.4.1 水中浸漬・乾燥の履歴

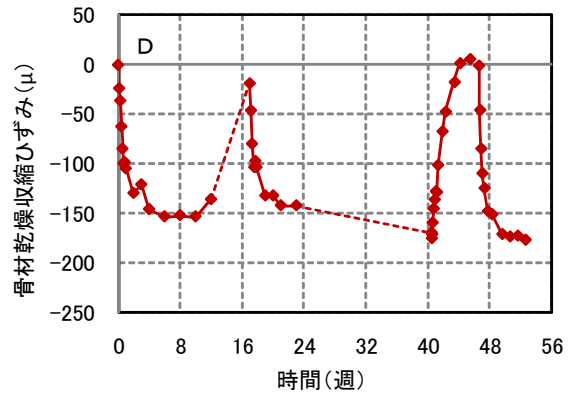
d) 収縮膨張履歴と終局乾燥収縮ひずみの結果

粗骨材原石の乾燥・水中浸漬試験における収縮・膨張の履歴結果を図 5.4.2 に示す。乾燥時に収縮し、水中浸漬時に収縮が回復している。

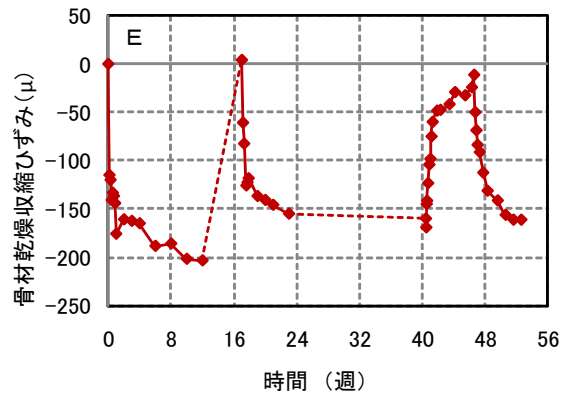
これらの図から、各原石の終局乾燥収縮ひずみを表 5.4.1 の値とした。

モデルの検証においては、実験に用いた細骨材の 80% が粗骨材 B と原石が同じであるので、細骨材の収縮ひずみ ϵ_s として粗骨材 B 原石の値である 105μ を用いた。

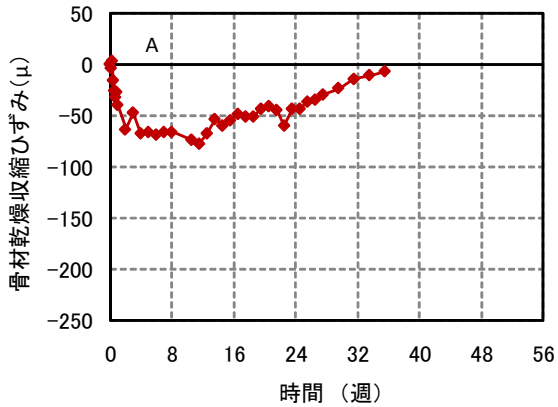
粗骨材の乾燥収縮ひずみとしては、表 5.4.1 に示す原石の実測値を用いた。



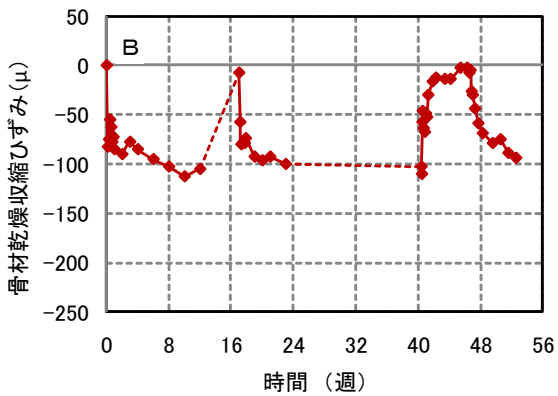
(d) 粗骨材 D



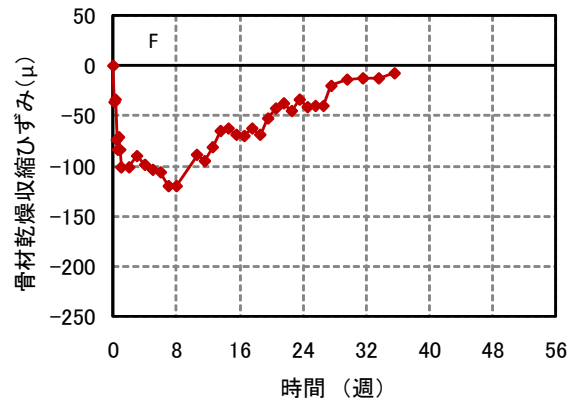
(e) 粗骨材 E



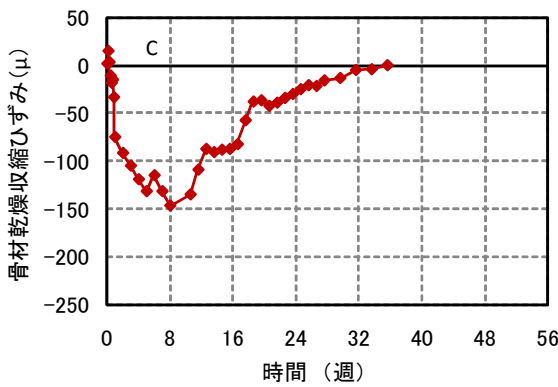
(a) 粗骨材 A



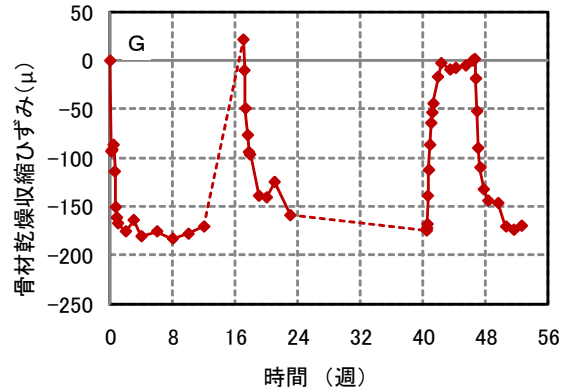
(b) 粗骨材 B



(f) 粗骨材 F



(c) 粗骨材 C



(g) 粗骨材 G

図 5.4.2 粗骨材原石の収縮ひずみ履歴

図 5.4.2 粗骨材原石の収縮ひずみ履歴

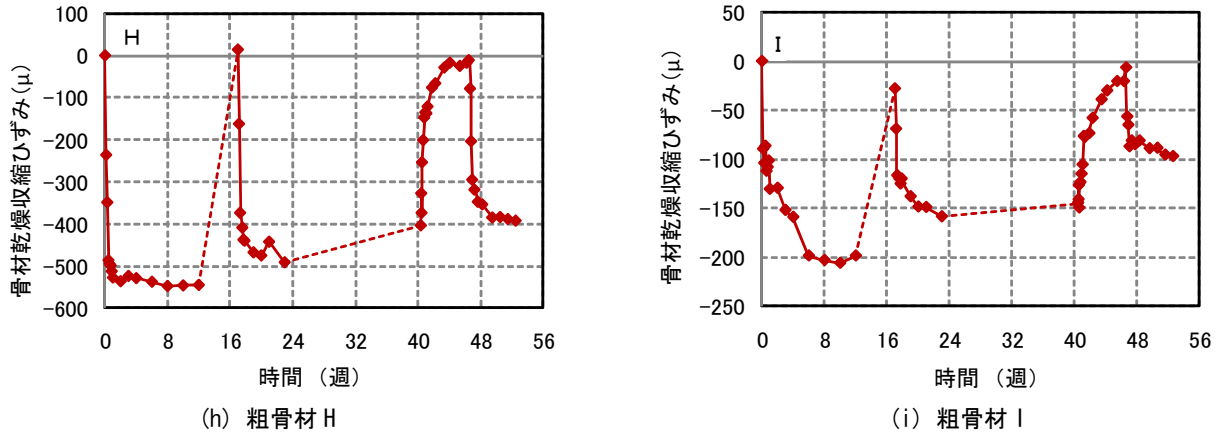


図 5.4.2 粗骨材原石の収縮ひずみ履歴

表 5.4.1 原石の終局乾燥収縮ひずみ

粗骨材の種類	A	B	C	D	E	F	G	H	I
終局乾燥収縮ひずみ (μ)	75	105	150	170	160	120	175	450	150

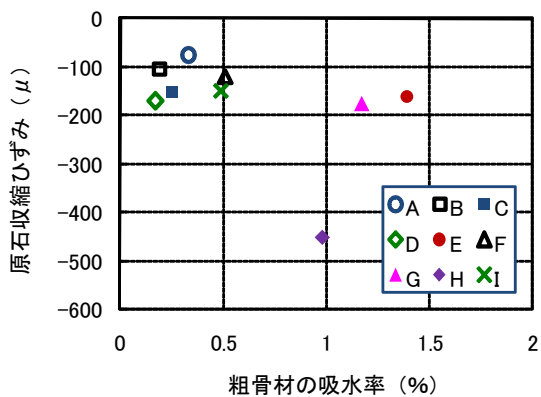


図 5.4.3 原石収縮ひずみと粗骨材吸水率との関係

原石の収縮ひずみと粗骨材の吸水率との関係を図 5.4.3 に示すが、一定の関係は見られない。

粗骨材原石の水中浸漬・乾燥試験における他の結果については付録 3 に示す。

(2) 粗骨材の内部空隙比表面積

a) 試験方法

i) 試料の調整方法

- ・ 破碎した粗骨材を 2.5-5mm の篩により篩い分け
- ・ 105℃乾燥法に準じて、105℃大気中にて 24 時間試料を乾燥

- ・ 乾燥後はシリカゲルを入れた保存ビンで試料を保管
- ii) 比表面積の測定
- ・ 使用機器：NOVA 4200e (ユアサイオニクス株式会社製)
- ・ 使用気体：窒素ガス
- ・ 溶媒：液体窒素
- ・ BET 多点法(吸着過程のデータ)の計算に使用した相対圧力： $P/P_0=0.1\sim 0.3$
- (なお、C の粗骨材については、相対圧力 $P/P_0=0.1\sim 0.5$ の範囲の測定結果が他に比べて異常な値となったので、相対圧力 $P/P_0=0.75\sim 0.3$ の範囲を用いて比表面積を計算している。)
- ・ BJH 法の計算(脱離過程のデータ)に使用した相対圧力： $P/P_0=0.19\sim 0.99$ (細孔直径 20Å 以上)

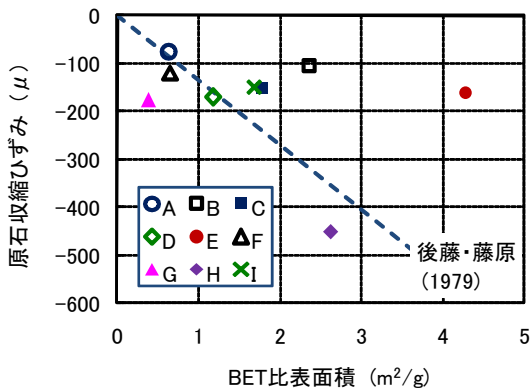
b) 試験結果

各粗骨材の BET 法および BJH 法による比表面積の測定結果を表 5.4.2 に示す。また、原石収縮ひずみと内部空隙比表面積との関係を図 5.4.4 に示す。原石の収縮ひずみと内部空隙比表面積との間には明確な関係は見られなかった。

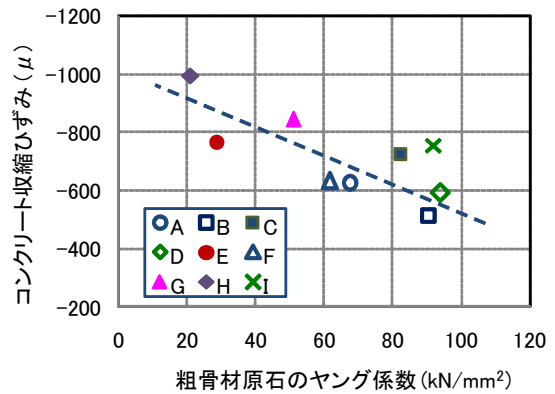
原石の乾燥収縮ひずみ以外との関係については付録 4 に示す。

表 5.4.2 粗骨材の内部空隙比表面積

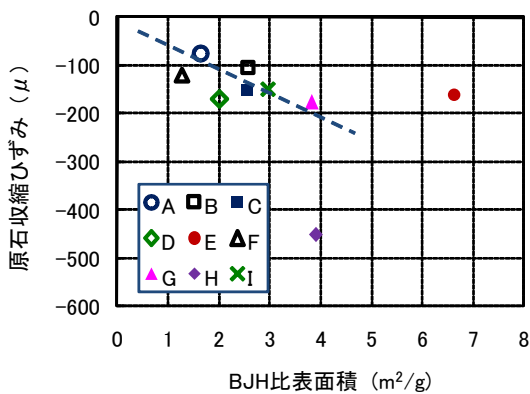
粗骨材の種類	A	B	C	D	E	F	G	H	I
BET 法 (m ² /g)	0.63	2.35	1.78	1.18	4.28	0.65	0.38	2.62	1.68
BJH 法 (m ² /g)	1.64	2.58	2.54	2.00	6.63	1.27	3.82	3.90	2.96



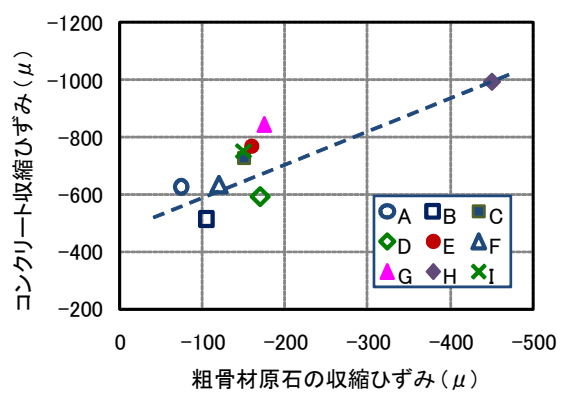
(a) BET



(a) ヤング係数



(b) BJH



(b) 乾燥収縮ひずみ

5.4.4 原石収縮ひずみと内部空隙比表面積との関係

図 5.5.1 コンクリートの乾燥収縮に及ぼす粗骨材特性の影響

5.5 予測モデルの検証結果

骨材特性の影響を考慮できるコンクリートの乾燥収縮ひずみの複合則を用いた予測方法における入力値は、配合要因として、

- ・セメントの種類
- ・水セメント比
- ・細骨材および粗骨材の単位容積比

骨材の特性として、

- ・細骨材および粗骨材のヤング係数
- ・細骨材および粗骨材の乾燥収縮ひずみ

である。本実験では、粗骨材の種類以外は同じ条件であるので、粗骨材のヤング係数と乾燥収縮ひずみだけが変動要因である。コンクリートの乾燥収縮ひずみに及ぼす粗骨材原石のヤング係数および原石乾燥収縮ひずみの影響を図 5.5.1 に示す。粗骨材のヤング係数が小さくなるにしたがって、また粗骨材原石の乾燥収縮ひずみが大きくなるにしたがってコンクリートの乾燥収縮ひずみが大きくなっているが、これらの片方の影響だけではコンクリートの収縮ひずみを精度良く表すことができないことを示している。

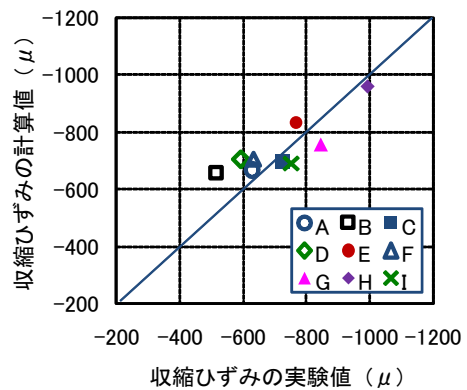


図 5.5.2 コンクリートの乾燥収縮の計算値と実験値

骨材のヤング係数および乾燥収縮ひずみを共に考慮した収縮予測モデルによるコンクリートの乾燥収縮の予測値と実験値との比較を図 5.5.2 に示す。このモデルでより精度よくコンクリートの乾燥収縮が予測できることを示している。なお、土木学会コンクリート標準示方書による乾燥収縮ひずみは骨材の種類にかかわらず 766μ の一定値となる。

6. 骨材の一部置換えに対応する乾燥収縮ひずみ予測プログラム

前章で述べた三相複合モデルでは、細骨材および粗骨材がそれぞれ単一材料であれば三相複合モデルが適用できるが、細骨材に海砂と砕砂とを混合したもののような場合や、粗骨材の一部を別の材料に置き換えるような場合には、4相あるいは5相の複合モデルが必要となる。4相複合モデルの場合には、次式のようになる。

$$\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_p} = \frac{1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_{a1}}{\varepsilon_p} \frac{E_{a1}}{E_p}\right) V_{a1} - \left(1 - \frac{\varepsilon_{a2}}{\varepsilon_p} \frac{E_{a2}}{E_p}\right) V_{a2} - \left(1 - \frac{\varepsilon_{a3}}{\varepsilon_p} \frac{E_{a3}}{E_p}\right) V_{a3}}{E_c / E_p} \quad (6.1)$$

これを、砂が二種類、粗骨材が一種類の形に書くと以下のようになる。

$$\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_p} = \frac{1 - \left(1 - n_{s1} \frac{\varepsilon_{s1}}{\varepsilon_p}\right) V_{s1} - \left(1 - n_{s2} \frac{\varepsilon_{s2}}{\varepsilon_p}\right) V_{s2} - \left(1 - n_g \frac{\varepsilon_g}{\varepsilon_p}\right) V_g}{E_c / E_p} \quad (6.2)$$

また、細骨材が単一材料、粗骨材に二種類の材料を用いる場合の式は以下のようになる。

$$\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_p} = \frac{1 - \left(1 - n_s \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_p}\right) V_s - \left(1 - n_{g1} \frac{\varepsilon_{g1}}{\varepsilon_p}\right) V_{g1} - \left(1 - n_{g2} \frac{\varepsilon_{g2}}{\varepsilon_p}\right) V_{g2}}{E_c / E_p} \quad (6.3)$$

$$\frac{E_c}{E_p} = 1 + \frac{2(n_s - 1)V_s}{n_s + 1 - (n_s - 1)V_a} + \frac{2(n_{g1} - 1)V_{g1}}{n_{g1} + 1 - (n_{g1} - 1)V_a} + \frac{2(n_{g2} - 1)V_{g2}}{n_{g2} + 1 - (n_{g2} - 1)V_a} \quad (6.4)$$

ここで、 $n_s = E_s / E_p$

$$n_{g1} = E_{g1} / E_p$$

$$n_{g2} = E_{g2} / E_p$$

$$V_a = V_s + V_{g1} + V_{g2}$$

であり、必要な情報は、配合要因として、

- ・細骨材および粗骨材二種類の単位容積比材料の特性として、
 - ・セメントペースト硬化体のヤング係数および乾燥収縮ひずみ
 - ・細骨材および粗骨材二種類のヤング係数および乾燥収縮ひずみ
- となる。

7. まとめ

本研究の結果をまとめると以下の通りである。

- (1) 骨材特性がコンクリートの乾燥収縮の大きさに影響を及ぼすメカニズムを考察した。
- (2) 細骨材および粗骨材の特性を考慮する複合則を用い

たコンクリートの乾燥収縮ひずみ予測方法の現状と問題点を考察した。

- (3) 粗骨材の種類によってコンクリートの乾燥収縮ひずみは異なってくる。
- (4) セメントペースト硬化体のヤング係数は、江口・寺西の式よりも約20%小さい結果となった。
- (5) セメントペースト硬化体の乾燥収縮ひずみは、混和剤の種類によって異なる。ひずみの大きさは、江口・寺西の式と比較して、増粘剤なしで式とほぼ同じ、増粘剤ありおよび減水剤ありで式よりも大きい結果となった。
- (6) 骨材原石のヤング係数は、原石の種類によって大きく異なる。モルタルとコンクリートのヤング係数試験結果を用いた複合則による粗骨材ヤング係数の推定値は、原石の実測値よりも小さい値となった。
- (7) 骨材原石は、乾燥によって収縮し、水中浸漬によって膨張する。このひずみの大きさは、原石の種類によって大きく異なる。原石の乾燥収縮ひずみと内部空隙性状を表すBET比表面積およびBJH比表面積とに明確な関係は見られなかった。
- (8) 複合則によって骨材のヤング係数および乾燥収縮ひずみを共に考慮すると、コンクリートの乾燥収縮ひずみが精度よく予測することができる。

参考文献

- 1) 百瀬晴基, 他: 全国のレディーミクストコンクリート工場を対象としたコンクリートの乾燥収縮に関する調査研究 (その1: 省力化乾燥収縮試験方法の概要と調査結果), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州), pp.291-292, 2007.8
- 2) 例えば, Raymond E. Davis "A Summary of the Results of Investigations Having to Do with Volumetric Changes in Cements, Mortars and Concretes, due to Causes other than Stress" ACI Journal Proceedings, Vol.26, pp.407-443, 1930
- 3) 2007年制定コンクリート標準示方書[設計編], 土木学会, pp.45-49, 2007
- 4) 鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説, 日本建築学会, pp.4-5, 2006
- 5) 松永静也: セメント・コンクリートの乾燥収縮, コンクリート工学, Vol.32, No.9, pp.31-36, 1994.9
- 6) 江口 清, 寺西浩司: 複合モデルを基盤としたコンクリートの乾燥収縮予測式, 日本建築学会構造系論文集, 第557号, pp.15-22, 2002.7
- 7) 大野和男: モルタル及びコンクリートの乾燥収縮と亀裂防止に関する研究, 北海道大学工学部研究報告, No.9, pp.49-110, 1953.12
- 8) G.Pickett: Effect of aggregate on shrinkage of concrete and

a hypothesis concerning shrinkage, Journal of ACI, No.52-36, pp.581-590, 1956.1

- 9) 岸谷孝一, 馬場明生: 建築材料の乾燥収縮機構, セメント・コンクリート, No.346, pp.30-40, 1975.12
- 10) T. C. Hansen: Influence of Aggregate and Voids on Modulus of Elasticity of Concrete, Cement Mortar, and Cement Paste, Journal of ACI, Vol.62, No.2, pp.193-216, 1965.2
- 11) 寺西・佐藤: 複合モデルを基盤としたコンクリートの乾燥収縮予測式—3相モデルへの展開および外的要因の影響の考慮—, 日本建築学会構造系論文集, 第602号, pp.21-28, 2006年4月
- 12) Z. Hashin: The elastic moduli of heterogeneous materials, Journal of Applied Mechanics, Vol.29, No.1, pp.143-150, 1962.4
- 13) T.C.Powers and T.L.Brownyard: Studies of the physical properties of hardened Portland cement paste, Journal of the American Concrete Institute, Vol.18, No.2, 1946.10
- 14) 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, 1976.3
- 15) 清原・永松・佐藤・三橋: 複合則理論を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみの予測式—終局乾燥収縮ひずみの評価方法—, 日本建築学会構造系論文集, 第590号, pp.9-16, 2005年9月

付録1 粗骨材の種類のみを変えたコンクリートの特性

A1.1 試験結果

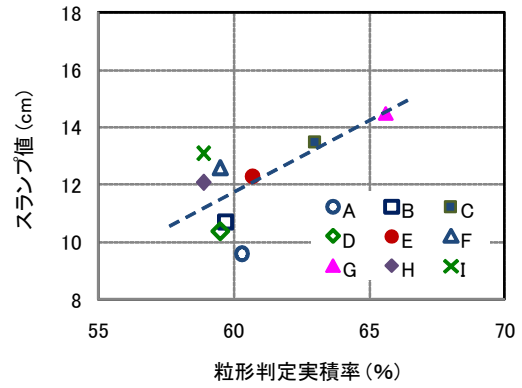
各碎石の粒形判定実績率とフレッシュコンクリートの試験結果を表A.1.1に示す。配合が同じでも、碎石の種類によってスランブが異なっている。

表 A.1.1 フレッシュコンクリートの特性

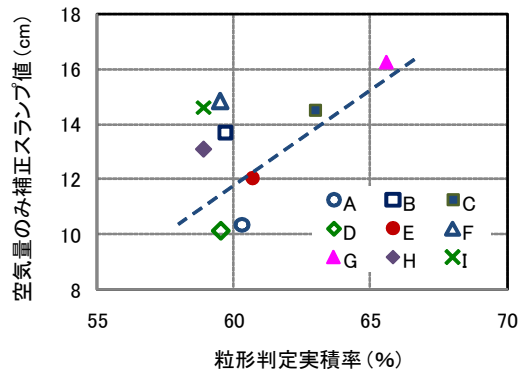
碎石の種類	粒形判定実績率 (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)
A	60.1	9.6	4.7	26.7
B	58.8	10.7	3.8	26.7
C	62.8	13.5	4.6	26.1
D	59.4	10.4	5.1	25.7
E	59.5	12.3	5.1	26.2
F	60.7	12.6	4.1	21.3
G	65.2	14.5	4.3	21.7
H	58.9	12.1	4.6	23.0
I	58.9	13.1	4.4	22.0

A1.2 スランブ値

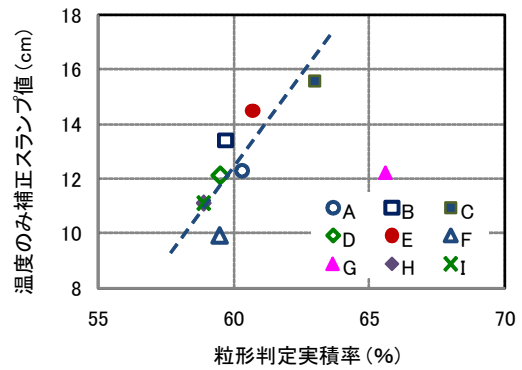
粒形判定実績率とスランブとの関係を図A.1.1に示す。



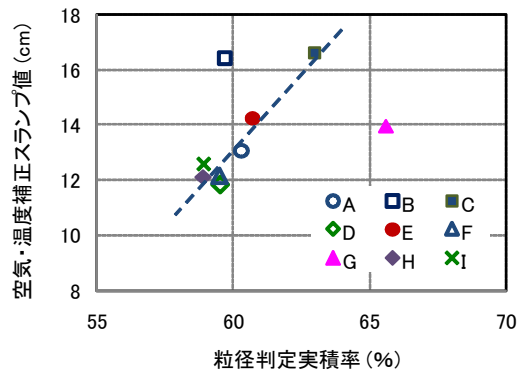
(a) 補正なし



(b) 空気量のみを補正



(c) 温度のみを補正



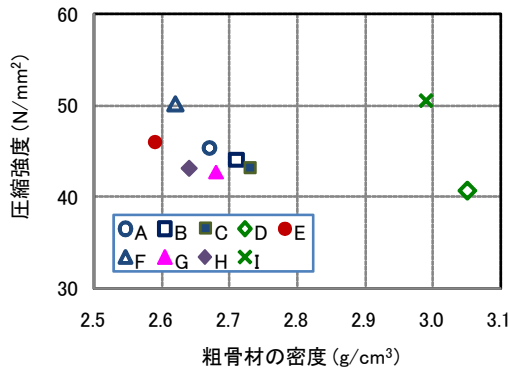
(d) 空気量と温度を補正

図 A.1.1 粒形判定実績率とスランブとの関係

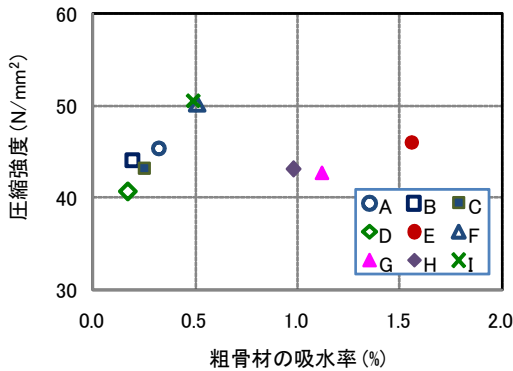
空気量の違いによる補正は空気量 1%あたりスランブ 2.5cm, 温度の違いによる補正は温度 1°Cあたりスランブ 1cm の値を用いた。空気量と温度の両方を補正すると、粒形実績率とスランブは一つの関係で表されるようになる。ただし、粗骨材 B と G は粗骨材の表面性状が他と異なり、粗骨材 B は他よりも表面が滑らか（つるつる）であり、粗骨材 G は表面が他よりも荒々しいものである。

A1.3 圧縮強度

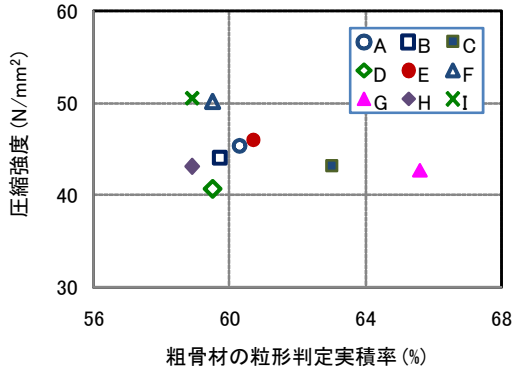
粗骨材の特性とコンクリートの圧縮強度との関係を図 A. 1. 2 に示す。圧縮強度と粗骨材の密度、吸水率および粒形判定実績率との間には関係は見られない。



(a) 粗骨材の密度



(b) 粗骨材の吸水率



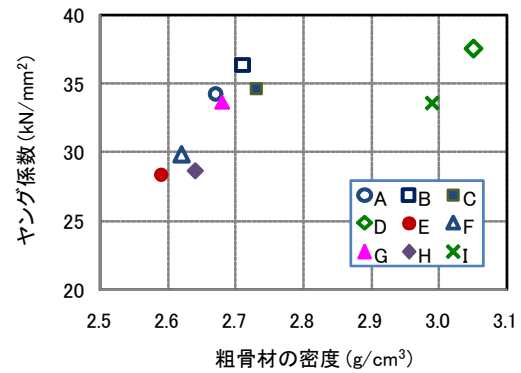
(c) 粗骨材の粒形判定実績率

図 A. 1. 2 粗骨材の特性と圧縮強度との関係

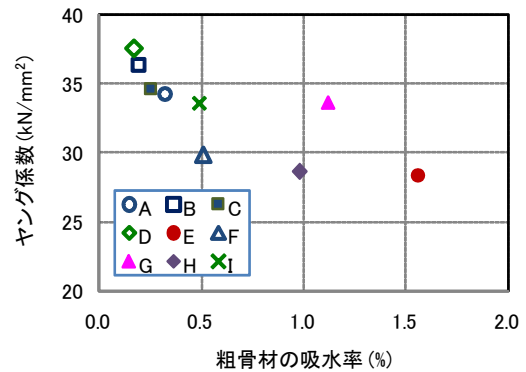
A1.4 ヤング係数

粗骨材の特性とコンクリートのヤング係数との関係を図 A. 1. 3 に示す。ヤング係数は、粗骨材の密度が大きくなると大となる傾向があり、粗骨材の吸水率が大きくなると小となる傾向がある。粒形判定実績率との関係は見られない。

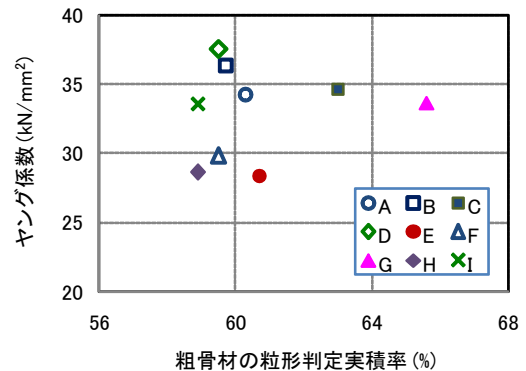
コンクリートの圧縮強度とコンクリートのヤング係数との関係を図 A. 1. 4 に示す。ヤング係数と圧縮強度との関係は見られない。



(a) 粗骨材の密度



(b) 粗骨材の吸水率



(c) 粗骨材の粒形判定実績率

図 A. 1. 3 粗骨材の特性とヤング係数との関係

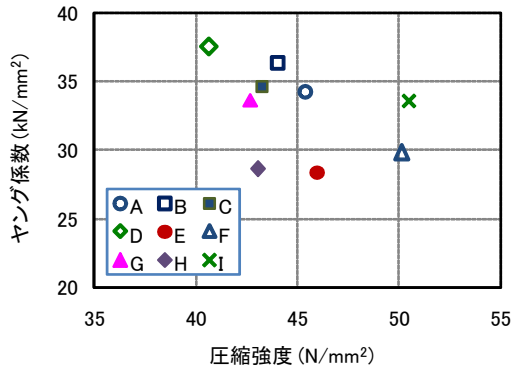


図 A. 1. 4 ヤング係数と圧縮強度との関係

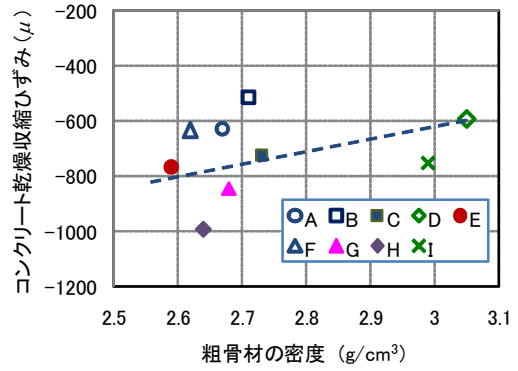


図 A. 2. 2 粗骨材の密度と乾燥収縮ひずみとの関係

付録2 粗骨材の種類のみを変えたコンクリートの乾燥収縮ひずみ

A2.1 粗骨材の吸水率との関係

粗骨材の吸水率とコンクリートの乾燥収縮ひずみとの関係を図 A. 2. 1 に示す。粗骨材の吸水率が大きくなるとコンクリートの乾燥収縮ひずみが大きくなる傾向がみられる。

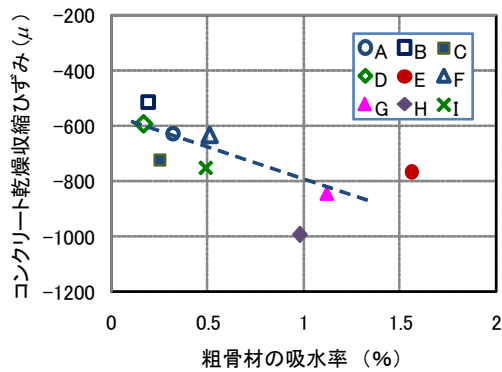


図 A. 2. 1 粗骨材の吸水率と乾燥収縮ひずみとの関係

A2.2 粗骨材の密度との関係

粗骨材の密度とコンクリートの乾燥収縮ひずみとの関係を図 A. 2. 2 に示す。粗骨材の密度とコンクリートの乾燥収縮ひずみには関係は見られない。

A2.3 コンクリートのヤング係数との関係

コンクリートのヤング係数とコンクリートの乾燥収縮ひずみとの関係を図 A. 2. 3 に示す。コンクリートの乾燥収縮ひずみは、コンクリートのヤング係数が大きくなると小さくなる傾向がみられる。

A2.4 乾燥時の質量変化

コンクリートの乾燥収縮試験体の質量変化率（質量減少量/元質量）の経時変化を図 A. 2. 4 に示す。質量変化率と収縮ひずみとの関係を図 A. 2. 5 に示す。この関係は骨材の種類によって異なる。曲線形状を詳細にみると、質

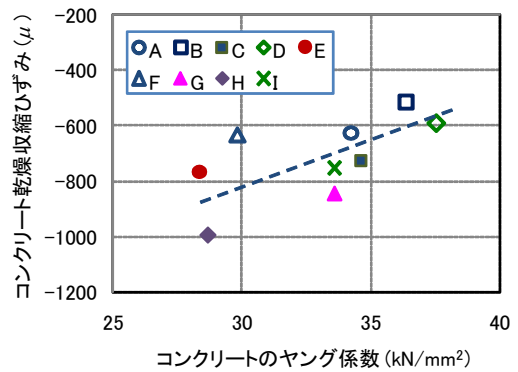


図 A. 2. 3 ヤング係数と乾燥収縮ひずみとの関係

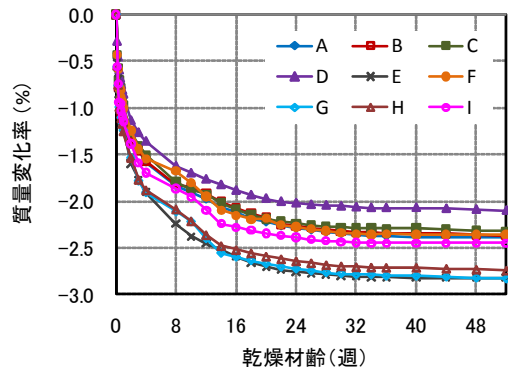


図 A. 2. 4 コンクリートの質量変化率

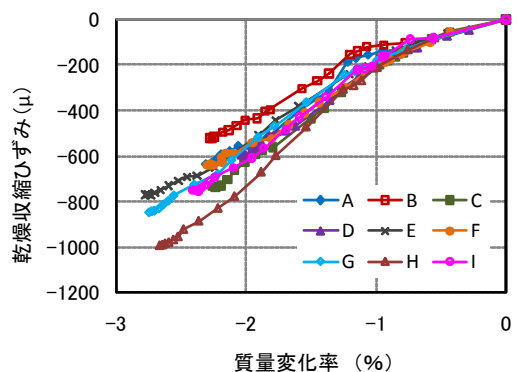


図 A. 2. 5 質量変化率と乾燥収縮ひずみとの関係

量変化率が1%程度で折れ点を持つ二直線のように見える。

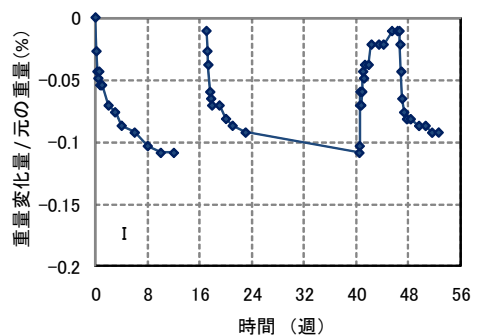
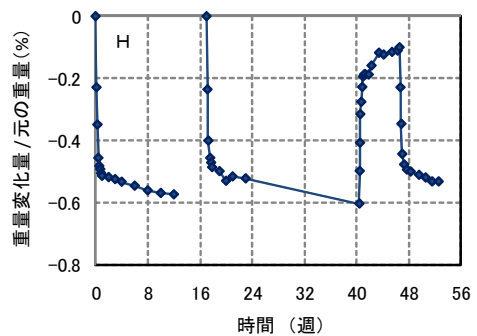
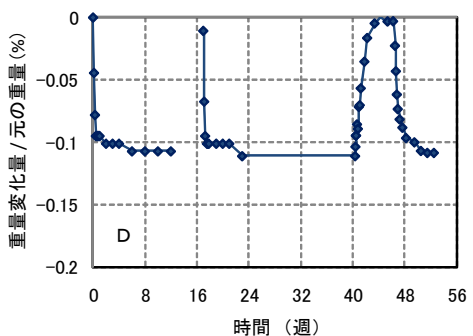
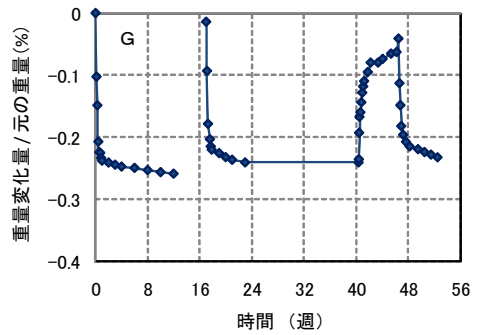
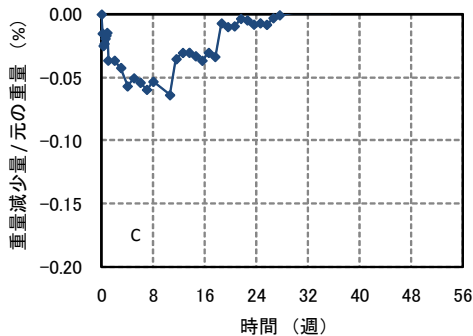
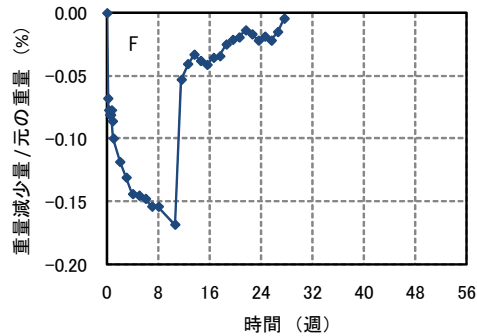
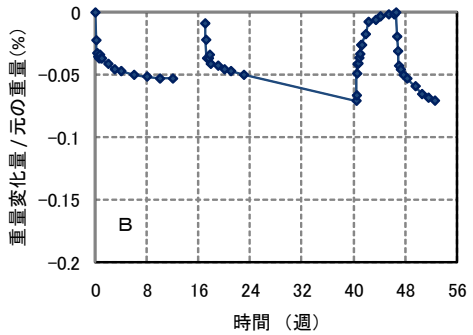
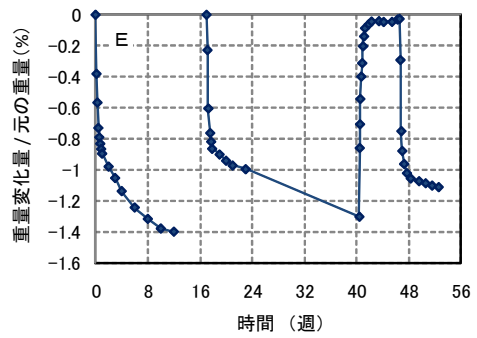
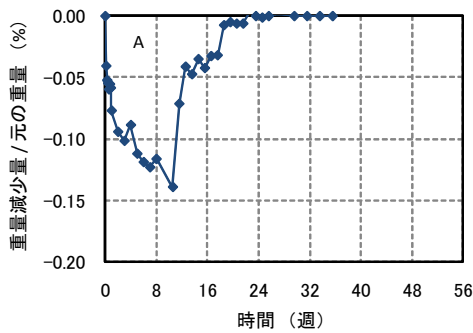
の値とした。

付録3 粗骨材原石の質量変化特性

A3.1 質量変化履歴と終局質量変化率

粗骨材原石の乾燥・水中浸漬試験における質量変化の履歴結果を図A.3.1に示す。乾燥時に質量が減少し、水中浸漬時に質量が回復している。

これらの図から、各原石の終局質量変化率を表A.3.1



図A.3.1 粗骨材原石の質量変化履歴

表 A. 3. 1 粗骨材原石の終局質量変化率

粗骨材の種類	A	B	C	D	E	F	G	H	I
質量変化率(%)	0.14	0.06	0.07	0.11	1.3	0.17	0.24	0.55	0.10

A3.2 質量減少率と原石収縮ひずみとの関係

粗骨材原石の質量減少率と乾燥収縮ひずみとの関係を図 A. 3. 2 に示す。両者の間にある関係は見られない。

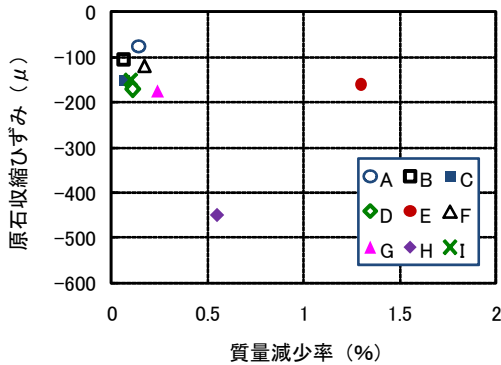


図 A. 3. 2 原石収縮ひずみと質量減少率との関係

A3.3 質量減少率と粗骨材吸水率との関係

粗骨材原石の乾燥による質量減少率と粗骨材の吸水率との関係を図 A. 3. 3 に示す。粗骨材の吸水率は、原石の質量減少率に対して、ひとつの粗骨材を除いて2倍以上のかなり大きい値となっている。

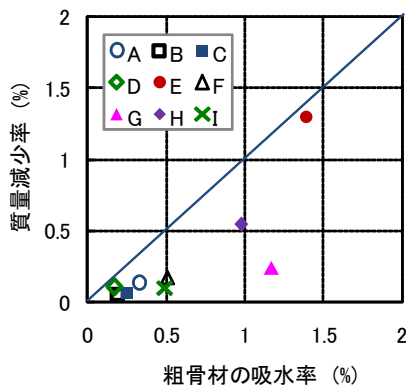
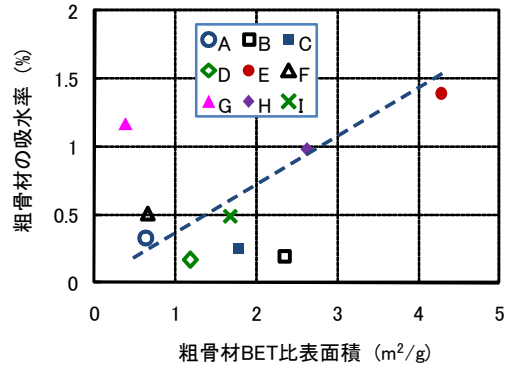


図 A. 3. 3 質量減少率と粗骨材吸水率との関係

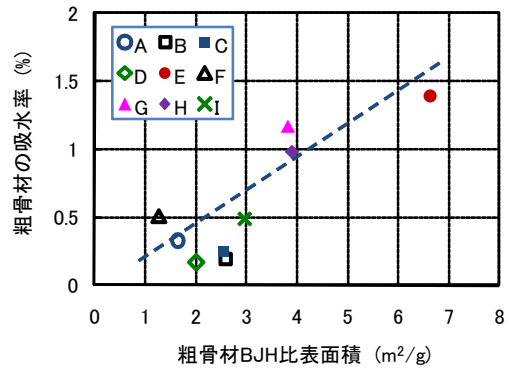
付録 4 骨材内部の空隙比表面積

A4.1 粗骨材の吸水率との関係

BET 比表面積および BJH 比表面積と粗骨材吸水率との関係を図 A. 4. 1 に示す。粗骨材の吸水率は、内部空隙比表面積が大きくなると大となる傾向があるが、今回の実験で内部空隙比表面積の測定値と最も相関が高かったのは BJH 比表面積と粗骨材の吸水率であった。



(a) BET

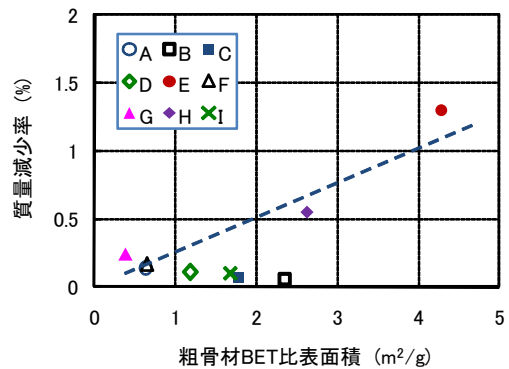


(b) BJH

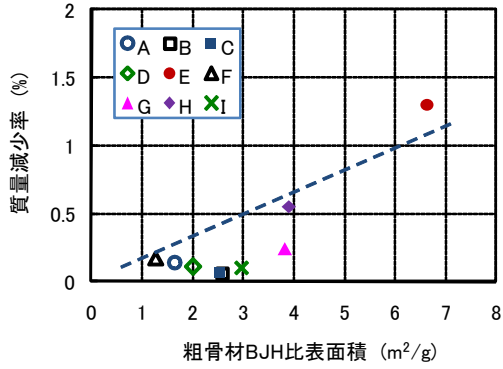
図 A. 4. 1 粗骨材の内部空隙比表面積と吸水率との関係

A4.2 原石の質量減少率との関係

BET 比表面積および BJH 比表面積と粗骨材原石の乾燥時質量減少率との関係を図 A. 4. 2 に示す。内部空隙比表面積が大きくなると原石の質量減少率は大となる傾向があるが、相関は高くない。



(a) BET

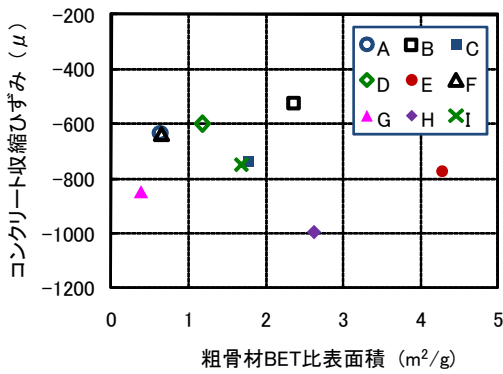


(b) BJH

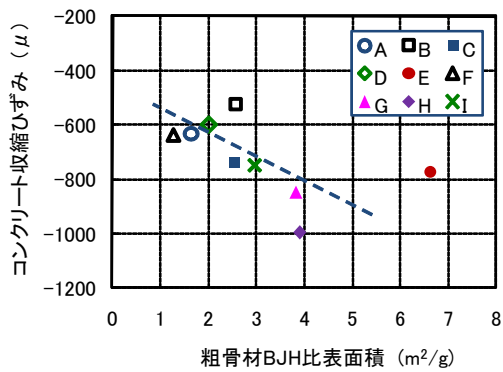
図 A. 4. 2 粗骨材の内部空隙比表面積と吸水率との関係

A4.3 コンクリート乾燥収縮ひずみとの関係

BET 比表面積および BJH 比表面積とコンクリートの乾燥収縮ひずみとの関係を図 A. 4. 3 に示す。



(a) BET



(b) BJH

図 A. 4. 3 コンクリートの収縮ひずみと内部空隙比表面積との関係