

論文 コンクリートの乾燥収縮に及ぼす栃木県産岩石の特性とその関連性

中根 政範*1・黒井登起雄*2・松村 仁夫*3

要旨: 栃木県で採取される硬質砂岩、石灰岩および玄武岩の岩石の特性を明らかにし、それら砕石を用いたコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響について実験的に検証した。その結果、岩石の吸水率は、岩種に関わらず非常に小さいこと、岩石の圧縮強度、静弾性係数および乾燥収縮ひずみは、岩種によって相違すること、岩石と同じ種類の砕石を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみは、岩種に関わらず 700×10^{-6} 程度以下であること、岩石の弾性係数および乾燥収縮ひずみは、コンクリートの乾燥収縮ひずみに大きく影響し関連性が高いことを明らかにした。

キーワード: 硬化コンクリート, 岩石, 乾燥収縮, 岩石の吸水率, 静弾性係数

1. はじめに

栃木県は、関東地域で最も砕石を生産・出荷している砕石供給県である¹⁾。栃木県の砕石は、北関東を含め、首都圏の多くのコンクリート製造工場で使用されている。

一方で、骨材を起因とするコンクリートの乾燥収縮による構造物のひび割れが問題となり²⁾、骨材の岩種や骨材自体の品質特性が乾燥収縮ひずみに影響を及ぼすことなどが多方面で指摘されている^{3), 4)}。

そこで、本研究では、栃木県で生産・出荷の多い硬質砂岩を中心に、栃木県産の岩石の特性を明らかにするとともに、これら砕石を用いたコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響について実験的に検証した⁵⁾。

2. 栃木県の地質および砕石供給量

栃木県における砕石の採取・製造地域は、佐野・栃木・鹿沼周辺である。砕石製造工場は、図-1に示すように、それらの地域に28社点在している。その地域の地層は、主に石灰岩、泥岩、砂岩、チャートや、砂岩と頁岩の互層、砂岩と泥岩の互層の状態の生物学的堆積岩、玄武岩、および流紋岩の火山性砕屑岩などで構成されている。地質年代では、中生代・ジュラ紀(約2億7000万年前～約1億4600万年前)にあたる⁶⁾。

図-2は、一例として関東地域におけるコンクリート用砕石の生産量の推移を示す。図-2より、栃木県は、関東地域の中で最も多くコンクリート用砕石が生産されており、平成23年の生産量が580万tである。これは関東地域の生産量(1667.2万t)の35%にあたる。

図-3は、栃木県における砕石全般の原石採取量を示す。図-3より、栃木県で採取・製造されている砕石の原石の種類は、砂岩および石灰岩が多い。平成23年の原石の採取量は、それぞれ589万tおよび611万tとなっており、ほぼ同等である。



図-1 栃木県の砕石の採取・製造工場⁶⁾

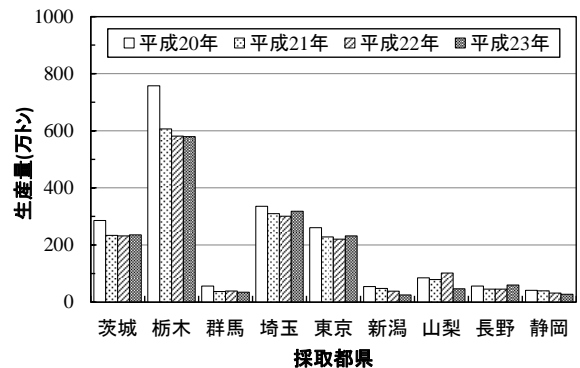


図-2 関東地域におけるコンクリート用砕石の生産量の推移¹⁾

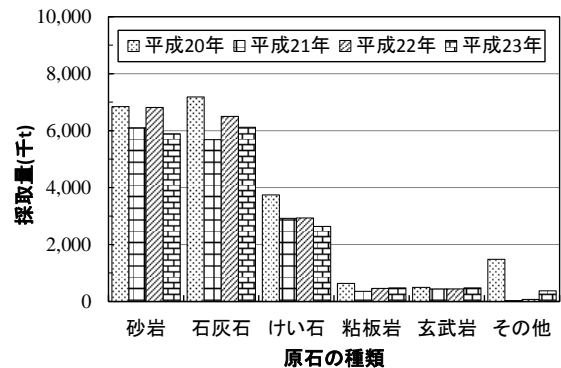


図-3 栃木県の砕石の原石別採取量¹⁾

*1 (有)モトキ建材(足利工業大学総合研究センター客員研究員) (正会員)

*2 足利工業大学 工学部創生工学科 教授 工博 (正会員)

*3 足利工業大学 工学部創生工学科 助手 (正会員)

表-1 使用骨材の種類と物理的性質

No.	岩種	密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	単位容積 質量(kg/l)	実積率 (%)	F.M.
1	硬質砂岩①	2.66	0.81	1.59	60.3	6.87
2	硬質砂岩②	2.70	0.49	1.63	60.7	6.88
3	硬質砂岩③	2.63	0.66	1.63	62.2	6.88
4	硬質砂岩④	2.62	0.56	1.63	61.9	6.91
5	硬質砂岩⑤	2.64	0.55	1.60	60.8	6.90
6	硬質砂岩⑥	2.68	0.50	1.62	60.6	6.89
7	硬質砂岩⑦	2.65	0.82	1.54	58.4	6.95
8	硬質砂岩⑧	2.66	0.71	1.59	60.0	6.92
9	石灰岩①	2.76	0.77	1.62	59.2	6.91
10	石灰岩②	2.70	0.76	1.61	60.1	6.79
11	玄武岩	2.92	0.53	1.59	54.8	6.95

※すべて最大寸法 20mm

表-2 コンクリートの配合

No.	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
			W	C	S	G	Ad
1	55	45.2	180	327	790	972	1.000
2		45.2	174	316	801	1000	0.900
3		45.2	175	318	799	972	1.000
4		45.2	162	294	824	1002	0.900
5		45.2	172	312	805	983	0.062
6		44.2	167	304	795	1027	0.046
7		46.2	167	304	831	978	0.055
8		46.2	167	304	813	1001	0.061
9		45.2	168	305	812	1037	0.900
10		45.2	167	303	814	1017	0.067
11		45.2	172	312	805	1088	0.900

3. 実験計画および実験方法

3.1 実験計画

実験は、力学的特性および乾燥収縮特性を明らかにすることを目的に、次の2つに分けて行った。

- (1) 栃木県産岩石の特性に関する実験
- (2) 栃木県産砕石を用いたコンクリートの特性に関する実験

3.2 使用材料および配合

岩石試料は、表-1 に示すように、採取地域の異なる硬質砂岩 8 種類、石灰岩 2 種類および玄武岩 1 種類の計 11 種類とした。

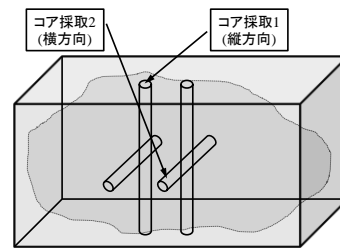
セメントは、普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm³）、細骨材は、川砂(密度 2.62g/cm³, 吸水率 2.49%, 粗粒率 2.68)、混和剤は、AE 減水剤を用いた。粗骨材は、表-1 に示すように、岩石試料と同じ 11 種類のものを用いた。コンクリートの配合は、表-2 に示すように、W/C=55%とし、スランブを 10±1cm、空気量を (5±1) % を目標とした。

3.3 実験方法

(1) 岩石供試体の作製

岩石試料は、11 種類の岩石から φ30mm×150mm のコアを採取したものを用いた。コアの抜き取り位置は、図

4 に示すように、岩石を静置した状態から垂直に抜いた場合（縦方向）と、それを 90° 回転させてコアを抜いた場合（横方向）とした。これらコア岩石試料は、それぞれ 3 個採取し、十分に吸水させ、飽水状態にするために、2 週間以上水中に浸漬させた。



コア採取1と2は、直角の位置関係

図-4 岩石試料のコア抜き取り位置の例

(2) 岩石の圧縮強度および静弾性係数試験

岩石の圧縮強度試験は、JIS A 1108 に、静弾性係数試験は、JIS A 1149 に準じて行った。岩石供試体は、図-5 に示すように、(1)で採取したコア岩石試料を直径と高さの比が 1:2(φ30×60mm)となるように成形したものを 6 個作製し、試験に供した。静弾性係数試験は、岩石供試体の高さ中央における円周および軸方向へ各 2 枚のひずみゲージを貼り付けて行った。

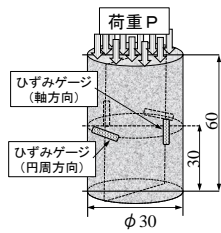


図-5 岩石の圧縮強度および静弾性係数試験用供試体の形状寸法とひずみゲージ貼り付け位置

(3) 岩石の乾燥収縮ひずみの測定

岩石の乾燥収縮ひずみの測定は、図-6に示すように、(1)で作製したコア岩石試料を恒温室(温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度 $((60 \pm 5)\% \text{RH})$)に保存し、コンタクトゲージ法(JIS A 1129-2)を用いて12~24週まで実施した。なお、基長は、60mm または 100mm とした。

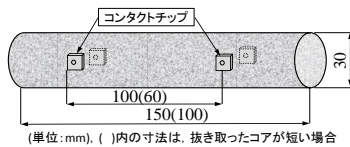


図-6 岩石の乾燥収縮ひずみ測定用試料の形状寸法

(4) コンクリートの圧縮強度および静弾性係数試験

コンクリートの圧縮強度試験は、JIS A 1108 に、静弾性係数試験は、JIS A 1149 にそれぞれ従って行った。

(5) コンクリートの乾燥収縮ひずみの測定

コンクリートの乾燥収縮ひずみの測定は、JIS A 1129-3 (ダイヤルゲージ法)に従って行った。

4 実験結果

4.1 栃木県産岩石の特性

(1) 岩石の密度および吸水率

岩石の密度は、図-7に示すように、硬質砂岩 $2.63 \sim 2.73 \text{g/cm}^3$ 、石灰岩 $2.71 \sim 2.78 \text{g/cm}^3$ 、玄武岩 2.97g/cm^3 であって、硬質砂岩、石灰岩、玄武岩の順に大きい値を示した。また、採取地域によって、 $0.07 \sim 0.1 \text{g/cm}^3$ 程度のばらつきがあった。

岩石の吸水率は、図-8に示すように、硬質砂岩 $0.07 \sim 0.59\%$ 、石灰岩 $0.19 \sim 0.25\%$ 、玄武岩 0.58% であって、若干ばらつきの大きいものも認められるが、岩石の種類に関わらず 0.6% 以下と非常に小さい値であった。

(2) 岩石の圧縮強度および静弾性係数

岩石の圧縮強度および静弾性係数は、表-3に示す。表-3より、硬質砂岩の圧縮強度は、 $126.6 \sim 200 \text{N/mm}^2$ を超えるものが多数認められた。また、静弾性係数は、 $6.30 \sim 8.23 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ であって、採取地域によって $0.99 \sim 1.93 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ 程度のばらつきが認められるが、圧縮強度と同様に大きな値を示した。なお、石灰岩および玄武岩は、それぞれ圧縮強度が $119 \sim 170 \text{N/mm}^2$ を超える

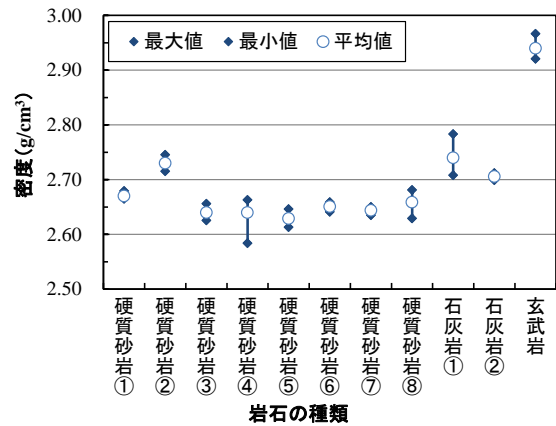


図-7 栃木県産岩石の密度

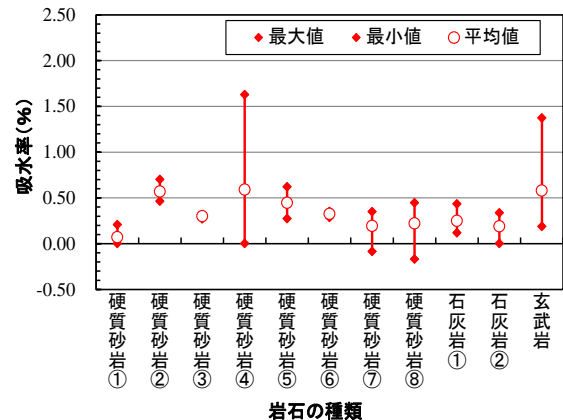


図-8 栃木県産岩石の吸水率

表-3 栃木県産岩石の圧縮強度および静弾性係数

No.	岩種	圧縮強度(N/mm^2) ^{※1}			静弾性係数 ($\times 10^4 \text{N/mm}^2$)
		最大	最小	平均	
1	硬質砂岩①	301.4	146.9	207.8	6.32
2	硬質砂岩②	134.7	113.0	126.6	6.48
3	硬質砂岩③	210.9 ↑	200.3	206.1 ↑	7.08
4	硬質砂岩④	210.1 ↑	199.7	204.4 ↑	8.23
5	硬質砂岩⑤	212.3 ↑	52.5	211.6 ↑	6.43
6	硬質砂岩⑥	212.3 ↑	102.5	188.6 ↑	6.30
7	硬質砂岩⑦	212.3 ↑	209.5 ↑	211.4 ↑	7.00
8	硬質砂岩⑧	210.9 ↑	208.1 ↑	209.5 ↑	6.58
9	石灰岩①	134.1	98.7	119.1	7.89
10	石灰岩②	209.5 ↑	93.0	174.2 ↑	6.90
11	玄武岩	139.1	44.1	84.1	8.02

※1 圧縮強度に付記した記号「↑」は、載荷重を150KNで終了したもの、若しくはその数値が含まれたもので、強度はその値以上を示す

ものおよび 84.1N/mm^2 、静弾性係数が $6.90 \sim 7.89 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ および $8.02 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ であった。

このように、本実験で使用した栃木県産の岩石は、密度および吸水率も良好な値であり、圧縮強度および静弾性係数も比較的大きな値を示しており、品質の良いものであると考えられる。

(3) 岩石の乾燥収縮ひずみ

図-9は、岩石から縦方向および横方向にそれぞれ採取した試料で、乾燥期間8週~12週における乾燥収縮ひ

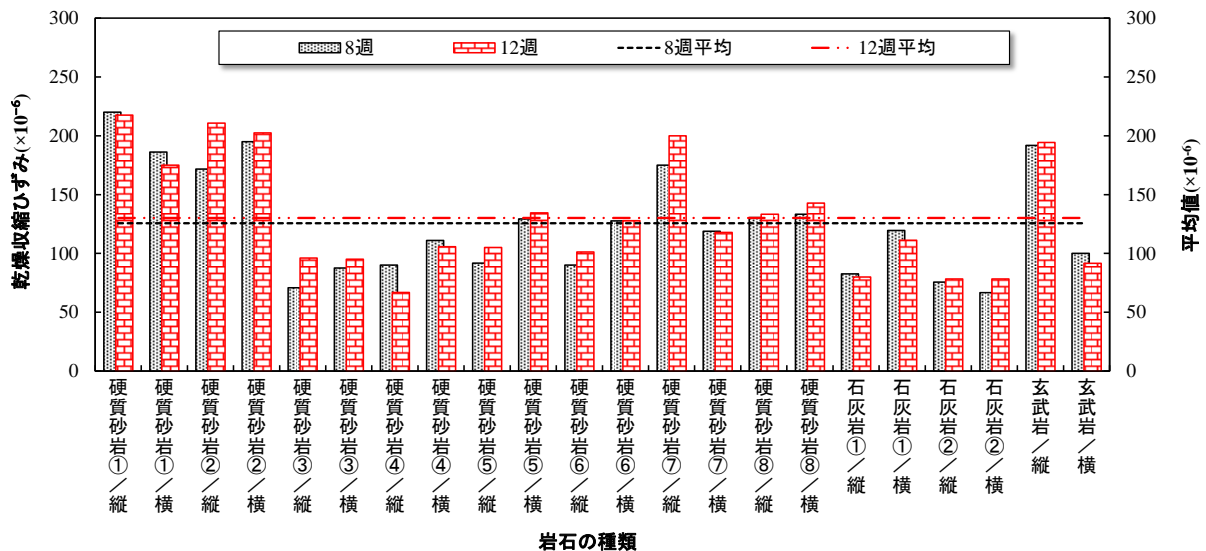


図-9 栃木県産岩石の乾燥収縮ひずみ

ずみを示した。図-9より、硬質砂岩の乾燥収縮ひずみは、乾燥期間12週で縦方向が $67\sim 218 \times 10^{-6}$ 、横方向が $95\sim 203 \times 10^{-6}$ の範囲であって、硬質砂岩①～⑧の採取地域やコア岩石試料の抜き取り方向によって大きく異なった。乾燥収縮ひずみの差異は、採取地域によって 100×10^{-6} 程度あり、コア岩石試料の抜き取り方向よりも岩石の採取地域の影響を強く受けているようである。また、石灰岩の乾燥収縮ひずみは、縦方向が $78\sim 80 \times 10^{-6}$ 、横方向が $78\sim 111 \times 10^{-6}$ 、玄武岩の乾燥収縮ひずみは、縦方向が 194×10^{-6} 、横方向が 92×10^{-6} であった。石灰岩は、硬質砂岩に比べ若干小さく、玄武岩は、縦方向で乾燥収縮ひずみが大きな値を示したものの、硬質砂岩と同程度であった。なお、岩石の乾燥収縮ひずみは、乾燥期間4週まで大きくなる傾向を示したが、それ以降大きな変化が認められなくなった。

4.2 栃木県産砕石を用いたコンクリートの特性

(1) コンクリートの圧縮強度および静弾性係数

図-10は、粗骨材として岩石と同じ11種類の砕石を

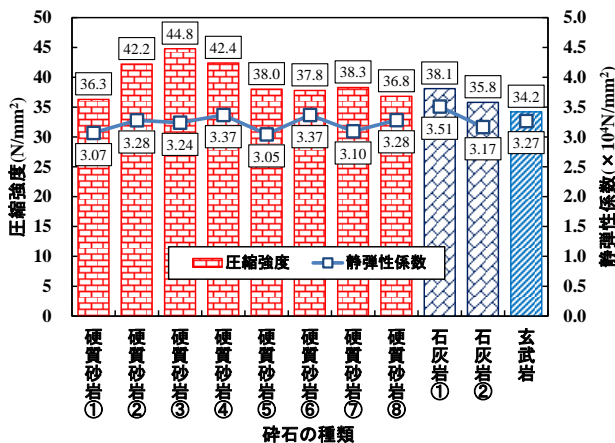


図-10 栃木県産砕石を用いたコンクリートの圧縮強度および静弾性係数

用いたコンクリートの圧縮強度および静弾性係数の結果を示す。図-10より、コンクリートの圧縮強度は、硬質砂岩砕石を用いた場合 $36.3\sim 44.8 \text{ N/mm}^2$ 、石灰岩砕石を用いた場合 $35.8\sim 38.1 \text{ N/mm}^2$ 、玄武岩砕石を用いた場合 34.2 N/mm^2 であった。硬質砂岩砕石②～④を用いた場合の圧縮強度は、他に比べ若干大きな値を示したが、その他の砕石を用いた場合は、ほぼ同程度の範囲の値を示した。また、コンクリートの静弾性係数は、 $3.06\sim 3.51 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ の範囲であって、岩石の種類および採取地域に関わらず同程度の値を示した。

したがって、本実験で使用した栃木県産の砕石を用いたコンクリートは、岩石の種類や採取地域に関わらず強度特性の良好なコンクリートが得られた。

(2) コンクリートの乾燥収縮ひずみ

図-11は、乾燥期間12、24および48週における各種砕石を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみの結果を示す。図-11より、乾燥期間48週におけるコンクリートの乾燥収縮ひずみは、硬質砂岩砕石を用いた場合 $536\sim$

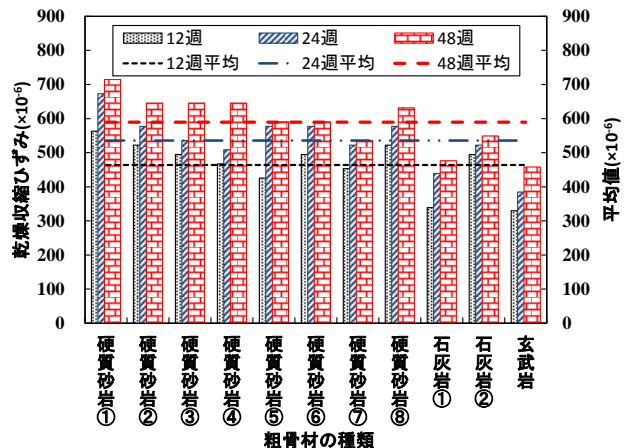


図-11 栃木県産砕石を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみ

715×10⁻⁶、石灰岩砕石を用いた場合 476～549×10⁻⁶、玄武岩砕石を用いた場合 458×10⁻⁶であった。硬質砂岩砕石を用いた場合の乾燥収縮ひずみは、採取地域によって若干差異が認められるものの、いずれの砕石を用いたコンクリートも乾燥収縮ひずみの許容値^{7), 8)}とされる 800～1000×10⁻⁶以下よりも小さい値となった。なお、乾燥収縮ひずみは、硬質砂岩①や石灰岩②のように、一部他の同じ岩種のコンクリートに比べ乾燥収縮ひずみが大きくなっている。この原因は、採取地域の地層によって、硬質砂岩や石灰岩が頁岩や泥岩との互層の状態に堆積している可能性によるものと考えられる。

以上の結果より、11種類の栃木県産の砕石を用いたコンクリートは、力学的特性および乾燥収縮特性ともに良好であると判断できる。

5. コンクリートの乾燥収縮ひずみと岩石の特性との関連性およびひずみ予測

5.1 コンクリートの乾燥収縮ひずみと岩石の特性との関連性

本章では、本実験で使用した栃木県産の11種類の岩石のほかに、別の実験⁹⁾で行った愛媛県産の岩石1種類を加えた計12種類について考察を加えた。

(1) 吸水率の影響

図-12は、栃木県産岩石の吸水率とコンクリートの乾燥収縮ひずみとの関係を示す。図-12より、栃木県産岩石の吸水率とコンクリートの乾燥収縮ひずみとの間には、今回の実験の範囲では関連性が認められなかった。しかし、栃木県産の岩石よりも吸水率の大きい愛媛県産の岩石を用いた場合、コンクリートの乾燥収縮ひずみも大きくなっているため、さらに吸水率の大きい岩石を用いた場合の結果を加えて再検証が必要であると考えられる。

(2) 乾燥収縮ひずみの影響

図-13は、栃木県産の岩石の乾燥収縮ひずみ（乾燥期間12週）とコンクリートの乾燥収縮ひずみとの関係を示す。図-13より、コンクリートの乾燥収縮ひずみは、若干ばらつきはあるが、岩石の乾燥収縮ひずみが大きくなると大きくなる傾向を示した。岩石の乾燥収縮ひずみは、300×10⁻⁶を超えると、コンクリートの乾燥収縮ひずみも800×10⁻⁶以上と非常に大きくなる傾向を示している。しかし、栃木県産の岩石の乾燥収縮ひずみは、67～218×10⁻⁶の範囲であって、この範囲であればコンクリートの乾燥収縮ひずみは、700×10⁻⁶程度以下となる可能性が高いことが示された。

(3) 静弾性係数の影響

図-14は、栃木県産の岩石の静弾性係数とコンクリートの乾燥収縮ひずみとの関係を示す。図-14より、コンクリートの乾燥収縮ひずみは、岩石の静弾性係数が小さ

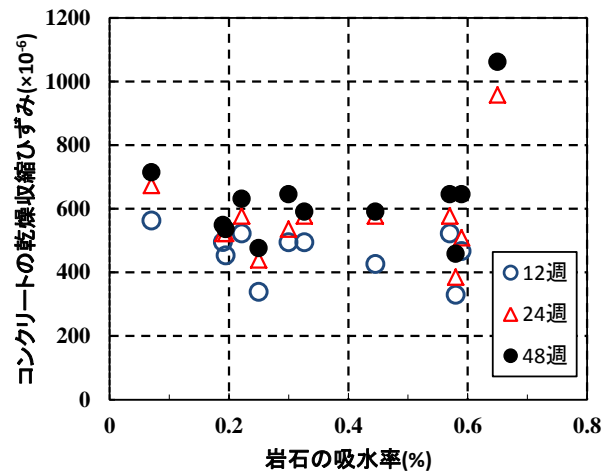


図-12 栃木県産の岩石の吸水率とコンクリートの完全収縮ひずみとの関係

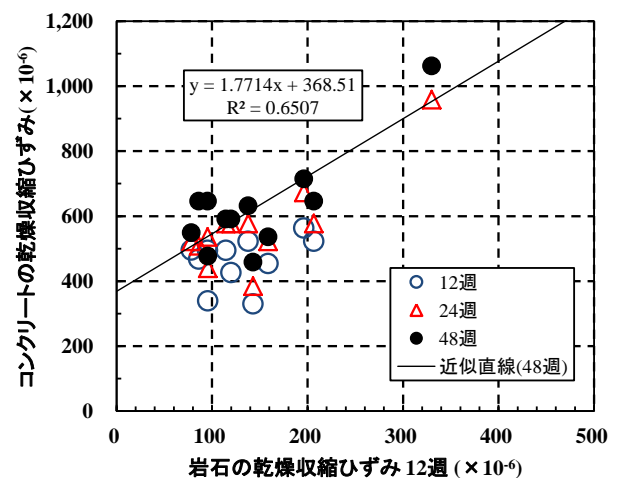


図-13 栃木県産の岩石の乾燥収縮ひずみとコンクリートの乾燥収縮ひずみとの関係

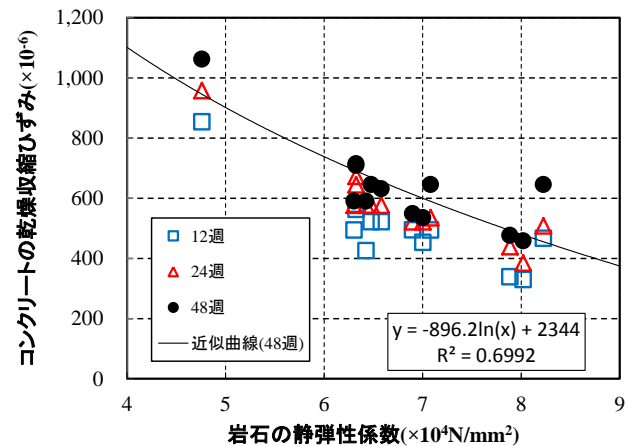


図-14 栃木県産の岩石の静弾性係数とコンクリートの乾燥収縮ひずみとの関係

いほど大きくなる傾向を示した。岩石の静弾性係数が 5×10⁴N/mm²以下の場合、コンクリートの乾燥収縮が 1000×10⁻⁶以上となっている。栃木県産の岩石の静弾性係数は、6.30～8.23×10⁴N/mm²の範囲であって、この範囲で

あればコンクリートの乾燥収縮ひずみは、 700×10^{-6} 程度以下となる可能性が高いことが示された。

したがって、既往の文献³⁾と同様に、コンクリートの乾燥収縮ひずみは、岩石の静弾性係数および岩石の乾燥収縮ひずみに大きく影響し、高い関連性が認められた。

5.2 コンクリートの乾燥収縮ひずみの予測

本章では、5.1の主に栃木県産の砕石を用いたコンクリートの結果より、岩石の乾燥収縮ひずみおよび岩石の静弾性係数とコンクリートの乾燥収縮ひずみを変数とした重回帰分析を行った³⁾。

重回帰式は、次のとおりである。

$$\varepsilon_c = -0.365 \varepsilon_g - 134.6Eg + 1583 \quad (1)$$

ここで、 ε_c ；コンクリートの乾燥収縮ひずみ($\times 10^{-6}$)

ε_g ；岩石の乾燥収縮ひずみ($\times 10^{-6}$)

Eg ；岩石の静弾性係数($\times 10^4 \text{N/mm}^2$)

図-15は、コンクリートの乾燥収縮ひずみの実測値と式(1)で求めたコンクリートの乾燥収縮の予測値との関係を示す。図-15より、コンクリートの乾燥収縮ひずみの予測値は、実測値と近似する傾向を示した。岩石の静弾性係数と岩石の乾燥収縮ひずみをあらかじめ求めることで、コンクリートの乾燥収縮ひずみを予測可能であることが示唆できた。また、これらの予測値を求めることで、コンクリートの乾燥収縮ひずみが許容値以下となる判断材料として活用できる可能性があると考えられる。

6. まとめ

栃木県で採取される硬質砂岩、石灰岩および玄武岩の岩石の特性およびそれら砕石を用いたコンクリートの乾燥収縮特性との関連性を検証した結果、以下の各点を明らかにすることができた。

- (1)岩石の品質は、圧縮強度および静弾性係数ともに大きく、岩石の種類に関わらず良好である。また、岩石の乾燥収縮ひずみは、岩石の種類によって差異が認められ、石灰岩と玄武岩が同程度であるが、硬質砂岩が採取地域によって 100×10^{-6} 程度大きくなる傾向を示した。
- (2)各種砕石を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみは、 700×10^{-6} 程度以下であった。栃木県産の砕石を用いたコンクリートは、岩石の種類に関わらず良好な乾燥収縮特性を示す。
- (3)岩石の静弾性係数および岩石の乾燥収縮ひずみとコンクリートの乾燥収縮ひずみとの間には、関連性が認められた。これらの値から重回帰式を求めることで、コンクリートの乾燥収縮ひずみを予測し評価できる可能性が示された。

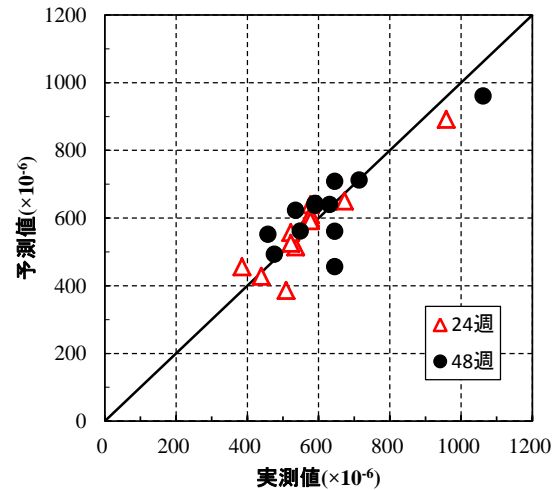


図-15 コンクリートの乾燥収縮ひずみの実測値と予測値との関係

謝辞

本研究を実施するに当たっては、砕石の提供に栃木県砕石工業協同組合に加盟する多くの砕石工場の皆様にご協力を頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 経済産業省：砕石動態統計調査，経済産業省ホームページ，2011.4
- 2) 例えば，土木学会コンクリート委員会：垂井高架橋の損傷に関する調査特別委員会最終報告書，2008.3
- 3) 兵頭彦次，谷村充，杉山真悟，佐藤良一：骨材のヤング係数・乾燥収縮に基づくコンクリートの乾燥収縮評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.33, No.1, pp.479-484, 2011.7
- 4) 真野孝次，中村則清：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（その1：原石コアの品質とコンクリートの乾燥収縮との関係），日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸），pp.933-934, 2010.9
- 5) 黒井登起雄，中根政範，松村仁夫：栃木県産の硬質砂岩砕石コンクリートの乾燥収縮特性，足利工業大学総合研究センター年報，第13号，pp.107-112, 2012
- 6) 産業技術総合研究所地質調査総合センター：20万文の1日本シームレス地質図（DVD版），（社）東京地学協会，2009
- 7) 土木学会：コンクリート標準示方書設計編，2008
- 8) 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
- 9) 小林悠人，斎藤広樹，宮澤伸吾：コンクリートの乾燥収縮に及ぼす骨材種類の影響，（社）日本コンクリート工学会協会関東支部栃木地区研究発表会講演概要集，pp.63-66, 2010.3