

未利用碎石副産物の有効利用 に関する基礎的研究(第1報)

—乾式プレス法によるダスト焼成人工骨材の作製条件—

古住光正^{※1)} 杉本文男^{※2)} 阿部正良^{※3)}

今井忠男^{※4)} 大塚尚寛^{※5)}

1. はじめに

社会資本形成の一翼を担うわが国の骨材は、1983年以来、天然骨材に代わり碎石、砕砂が主要資材となっている。わが国の碎石総生産量は、経済産業省製造産業局住宅産業窯業建材課の推計¹⁾によると平成3年度の5億3千万トンピークに年々減少傾向をたどり、平成14年度は約4億5千万トンとなっている。

その用途は、コンクリート用62%、道路・道床他37%となっており、コンクリート用材の比率が増加している

のが特徴である。

ところで、近年生産量が增大している砕砂の生産においては、脱水ケーキ、スラッジ、ダスト、あるいは碎石粉等といった未利用副産物をも大量に生み出している。表1は、一例として、平成15年度の岩手県における主要碎石山の年間碎石生産量、副産物の発生量ならびにその利用状況を示したものである。これを見ると、碎石生産量に対する副産物の発生率は、事業所によって異なるものの、平均で概ね5%前後の値を示し、これからわが国の碎石副産物の発生量を推定すると、その量は膨大とな

表1 平成15年度の岩手県主要碎石事業所の年間碎石生産量、碎石副産物発生量およびその利用状況

事業所	碎石生産量 (トン)	副産物発生量(トン)		碎石・砕砂 製造方法	副産物利用状況	岩種
		脱水ケーキ	碎石粉			
A	171,000	14,400		湿式プレス	堆積場放置	安山岩
B	110,000		5,000	乾式	クラッシャーラン混合	ホルンフェルス
C	691,000		15,176		クラッシャーラン混合	砂岩
D	820,000		40,000	乾式	クラッシャーラン混合	粘板岩
E	447,000	27,000		湿式プレス	生石灰と混合、 現場埋め戻し	硬質砂岩
F	369,000	3,000		湿式プレス	土質改良機保有、販売先 なし	粘板岩
G	1,048,000		11,600	乾式	クラッシャーラン混合 現場埋め戻し	輝緑岩
H	235,000	6,300		湿式プレス	現場埋め戻し	安山岩
I	220,000		9,000		クラッシャーラン混合	硬質砂岩
J	177,000	11,000		湿式プレス	現場埋め戻し	硬質砂岩
合計	4,288,000	142,476				

※1)、※3)、※5) 岩手大学工学部 建設環境工学科

※2)、※4) 秋田大学工学資源学部 地球資源学科

ることがわかる。

現在、これら副産物の直接的な利用は、碎石および砕砂を乾式生産しているところでは、碎石粉をクラッシャーランに混合して路盤材として出荷する例もあるが、湿式生産で発生する碎石スラッジ等は、ほとんどが有効利用されずに現場に投棄されるか、埋め立て処分されているのが現状である。

一方、碎石副産物の付加価値利用は、セメントや粘土をバインダーとした人工軽量骨材、陶器、瓦、レンガ等への応用²⁾、あるいは重金属類を含有する各種廃棄物の焼却灰を碎石スラッジおよび粘土等とともに加熱してガラス固化体を作り、これを原料として路盤材、舗道材あるいは擁壁ブロック等に応用した例³⁾等が見られる。

しかし、こうした研究は全体から見れば極めて少なく、今後一層、未利用碎石副産物に対する有効利用の検討が望まれている。

筆者らは、これまでに碎石副産物の有効活用の観点から、種々の製品開発に関する基礎的研究を行ってきた^{4) 5) 6)}。

本研究では従来の一連の研究において、乾式プレス法を採用したときのダスト焼成人工骨材の作製条件、すなわち成型圧、焼成温度、焼成時間、ダスト粒子ならびに粘土配合比等について、圧縮強度、吸水率および絶乾比重の観点から検討を加えたので、これらについて報告する。

2. 使用材料および人工骨材の作製方法

本研究で用いた材料は、岩手県内の2碎石場から採取した硬質砕岩と安山岩のダストおよび粘土である。表2に供試岩石の力学的性質を示す。また、図1に採取ダストの粒度分布曲線を示す。実験では篩い分けした粒径0.3mmアンダーと0.04mmアンダーのダストを用いた。粘土の粒径は、0.04mmアンダーである。

図2に本研究で行った乾式プレス法による焼成人工骨材の作製フ

ローを示す。図2より、ダスト焼成人工骨材の作製手順を述べると、以下の通りである。

まず、①十分に自然乾燥させたダストと粘土を設定重量配合比に混合する。②骨材1個分の試料を秤量し、円筒治具型枠に入れる。③治具の押し棒を介して試料に設

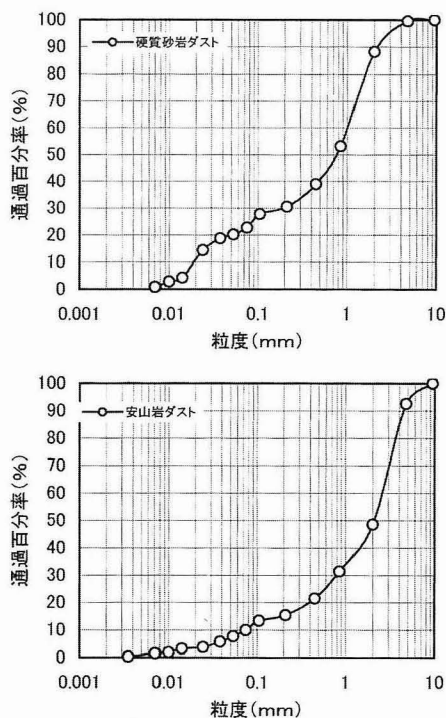


図1 採取ダストの粒度分布曲線

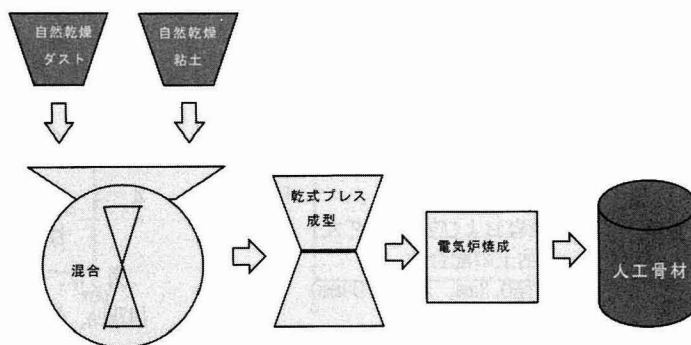


図2 乾式プレス法による焼成人工骨材の製作フロー

(18)

定圧をかける。④脱型した試料を電気炉内に入れ、設定温度で焼成する。⑤設定焼成時間後、電源を切り、焼成試験片を炉内で自然冷却する。

以上のようにして作製した焼成試験片は、約φ20mm×20mmである。

3. 実験方法

実験では、まずはじめに、乾式プレス法を採用した場合の最適な成型圧、焼成温度および焼成時間を明らかにするために、人工骨材のバインダとして重要な役割を持つ粘土試料を対象に、成型圧を49、98、147MPa、焼成温度を900、1,000、1,100°C、焼成時間を3、15、45hとしたときの焼成粘土試験片について、圧縮強度、吸水率ならびに絶乾比重を検討した。

次いで、0.3mm粒径の硬質砂岩ならびに安山岩ダスト試料を用いて粘土試料と同様な実験を行い、焼成粘土試験片から予測した最適作製条件が、ダスト試料に対しても適合するかを検証する中で、乾式プレス法によるダスト焼成人工骨材の最適作製条件を特定した。

次に、ダスト焼成骨材に及ぼすダスト粒度の影響を明らかにするために、先に特定した作製条件によって作製した粒径0.3mmと0.4mmの硬質砂岩ならびに安山岩ダスト試験片について、圧縮強度、吸水率、絶乾比重および有効空隙率を検討した。

また、ダスト焼成骨材に対する粘土配合比の検討については、表3に示す種々のダスト/粘土配合試験片を用

表2 供試岩石の力学的性質

	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	割線ヤング率 (MPa)	吸水率 (%)	絶乾比重 —
硬質砂岩 ¹⁾	257	16	4.5 × 10 ⁴	0.44	2.65
安山岩 ²⁾	232	17	3.9 × 10 ⁴	1.79	2.64

1) 岩手県九戸郡山形村産
2) 岩手県岩手郡西根町産

表3 硬質砂岩および安山岩ダストと粘土の配合比
(ダスト粒径0.3mm、粘土0.04mm)

ダスト	配合比(重量%)						
	100	90	70	50	30	10	0
粘土	0	10	30	50	70	90	100

意し、それら試験片の圧縮強度、吸水率ならびに絶乾比重を検討する中で、JIS A 5002の強度最高区分の規準を満たす硬質砂岩、ならびに安山岩ダスト焼成骨材の最小配合粘土比を決定した。

本研究で使用した試験片の物性は、以下のように定義した。

一般に粗骨材の圧縮強度 Sc (N/mm²) は、プランジャで圧縮するイギリス規格 (BS) 法⁷⁾、あるいはアメリカ開拓局法⁸⁾ によって求められるが、本研究では試験法の容易さを考慮して、通常の岩石強度試験法に準拠した。

$$Sc = \frac{P}{A} \quad (1)$$

ここに、 P は破壊荷重、 A は載荷断面積である。

吸水率 Q (%), 絶乾比重 ρ ならびに有効空隙率 n (%) は、焼成試験片を48時間水中で飽和させたときの湿潤重量 (W_3)、水中重量 (W_2) および48時間 105°Cで乾燥させたときの乾燥重量 (W_1) を測定し、それぞれ次式によって算出した。

$$Q = \frac{(W_3 - W_1)}{W_1} \times 100 \quad (2)$$

$$\rho = \frac{W_1}{(W_3 - W_2)} \quad (3)$$

$$n = \frac{(W_3 - W_1)}{(W_3 - W_2)} \times 100 \quad (4)$$

なお、各試験に供した試験片の個数は平均10個である。

4. 実験結果ならびに考察

4. 1 粘土試料による成型圧、焼成温度ならびに焼成時間の検討

図3は、焼成時間を3時間一定とし、成型圧を49、98、147MPa、焼成温度を900、1,000、1,100°Cとして作製した粘土試験片の成型圧に対する圧縮強度、吸水率ならびに絶乾比重の関係である。焼成粘土試験片は、いずれの焼成温度においても成型圧の増加に伴い圧縮強度ならびに

絶乾比重は増大し、吸水率は低下した。そして、成型圧が147MPa、焼成温度が1,100°Cのときに、圧縮強度ならびに絶乾比重は最大となり、吸水率は最小となった。これは、乾式プレス法におけるプレス圧の増加が粉体の圧密化を促し、焼成温度の増加が粘土の溶融化を促進させたためと考えられる。また図3を詳細に観察すると、焼成温度に対する物性変化の度合いは、1,000°C~1,100°Cの間で顕著となっている。これは粘土の相転移に起因する

ものであると考えられ、粘土鉱物を含む岩石の高温下の圧縮強度が、1,100°C付近で最大となる山口らの報告⁹⁾とも符合して興味深い。

本節では、粘土試料を対象にして焼成人工骨材の作製条件を検討したが、強度を強く発現させ、かつ吸水率を低くさせることが人工骨材の作製における必要条件とすると、乾式プレス法における成型圧は147MPa、また焼成温度は1,100°Cが妥当と判断した。

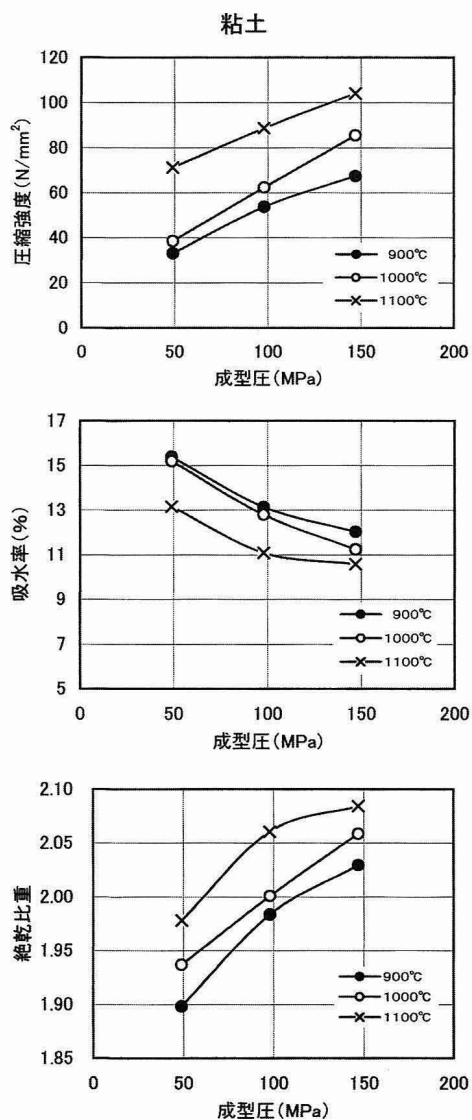


図3 焼成粘土試験片の物性に及ぼす成型圧ならびに焼成温度の影響 (焼成時間3 hour)

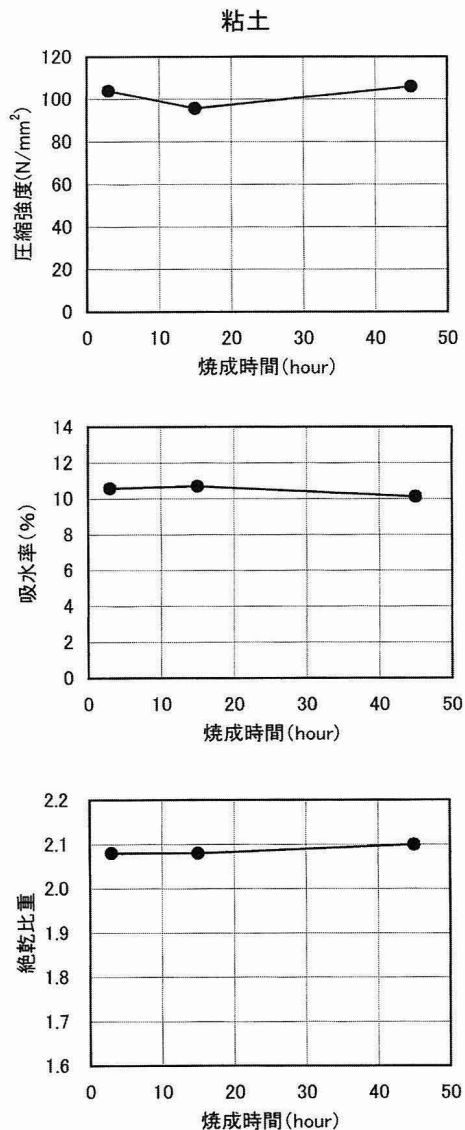


図4 焼成粘土試験片の物性に及ぼす焼成時間の影響 (成型圧147MPa、焼成温度1,100°C)

(20)

図4は、成型圧を147MPa、焼成温度を1,100°C一定とし、焼成時間を3、15、45時間として作製した粘土試験片の焼成時間に対する圧縮強度、吸水率ならびに絶乾比重の関係である。図4より、焼成時間に対する圧縮強度、吸水率ならびに絶乾比重の関係を見ると、焼成時間を最小

3時間、最大45時間とした範囲の物性には、ほとんど有意な差異は認められなかった。このことは、粘土試験片の溶融化は焼成時間3時間程度で達成されることを示すものであり、これより乾式プレス法における焼成時間は3時間と予測した。

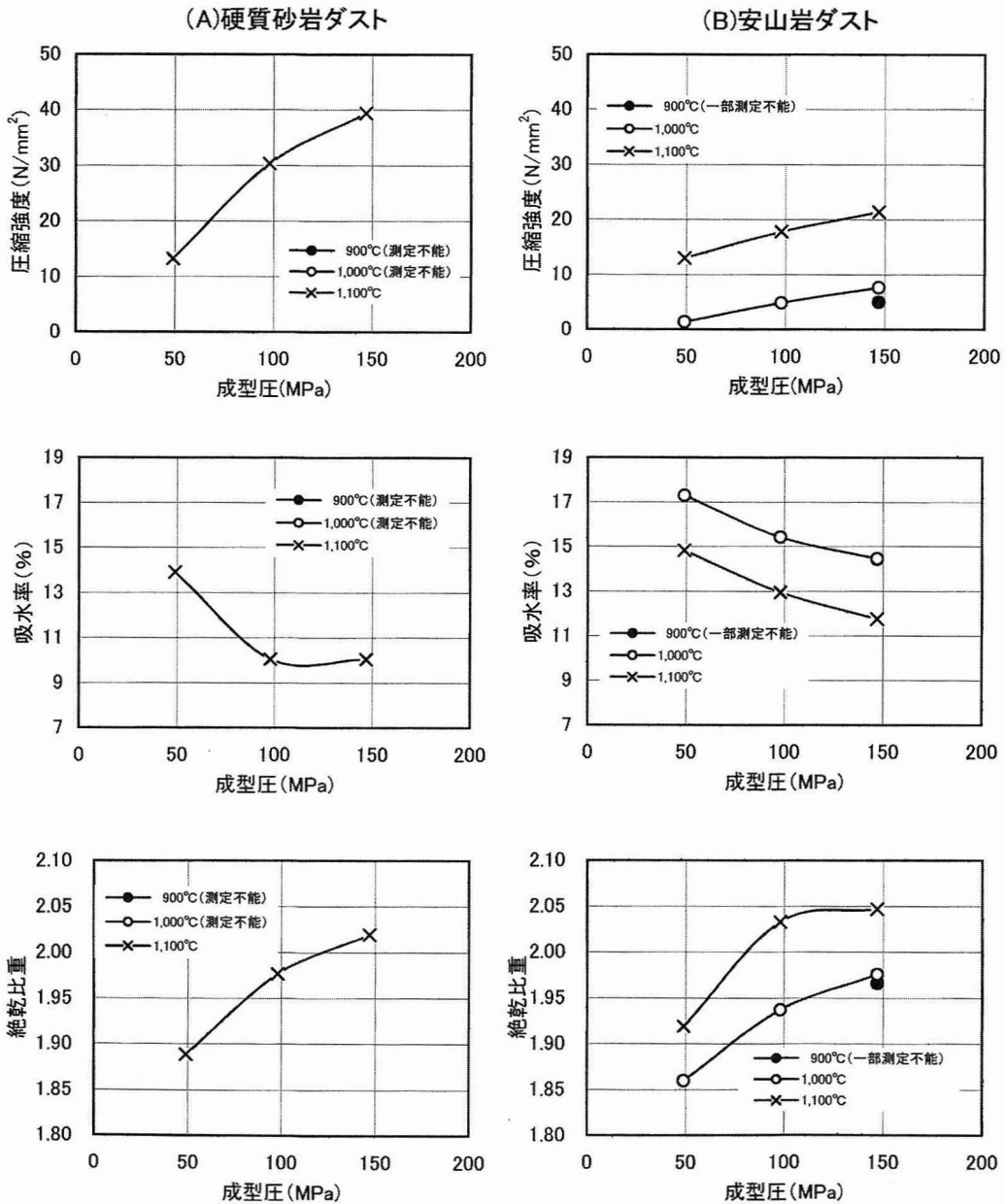


図5 焼成ダスト試験片の物性に及ぼす成型圧ならびに焼成温度の影響 (ダスト粒度0.3mm、焼成時間3 hours)

4. 2 ダスト試験片による成型圧、焼成温度ならがに 焼成時間の検討

図5は、粘土試料で予測した人工骨材の作製条件を検証するために、焼成時間を3時間一定とし、成型圧を49、98、147MPa、焼成温度を900、1,000、1,100℃として作製

した硬質砂岩ならびに安山岩の粒径0.3mm ダスト試験片の結果を示したものである。図5より、硬質砂岩ダストを見ると、焼成温度1,100℃でのみ粘土試料と同様な成型圧の増加に伴う圧縮強度ならびに絶乾比重の増大と、吸水率の低下が認められるが、それ以下の温度条件では試

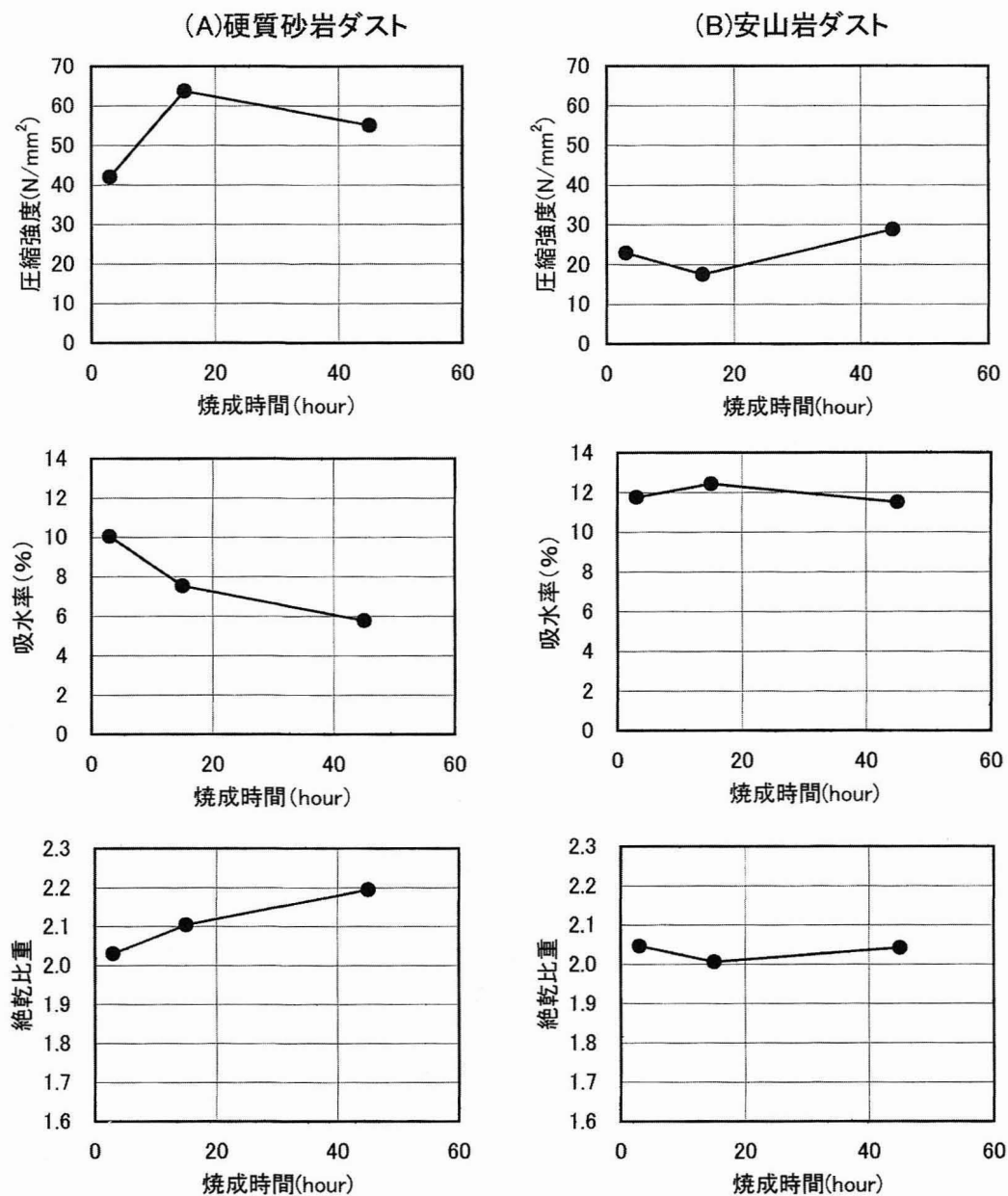


図6 焼成ダスト試験片の物性に及ぼす焼成時間の影響
(ダスト粒度0.3mm、成型圧147MPa、焼成温度1,100℃)

験片の固結度が低下して測定は不能となった。図5の(A)において、焼成温度が1,100℃の場合にのみデータが得られたということは、硬質砂岩ダストは、同温度付近で溶結が開始したためであり、このことは試験片の肉眼的観察からも伺える。しかし、詳しい検討については、第2報の岩種を増やした鏡下観察から言及したいと考えている。

次に、安山岩ダストでは、焼成温度900℃の成型圧49および98MPaにおいて測定データは得られていないが、温度条件の1,000と1,100℃では、成型圧の増加とともに圧縮強度ならびに絶乾比重は増加し、吸水率が低下した。そして、安山岩ダストにおいても粘土試料および硬質砂岩ダストと同様に、成型圧が147MPa、焼成温度が1,100℃のときに圧縮強度と絶乾比重は最大となり、吸水率は最小となった。

図6は、成型圧を147MPa、焼成温度を1,100℃一定とし、焼成時間を3、15、45時間として作製した硬質砂岩ならびに安山岩の粒度0.3mmダスト試験片の焼成時間に対する圧縮強度、吸水率ならびに絶乾比重の関係を示したものである。図6より、両岩種の3時間と45時間の圧縮強度を比較すると、圧縮強度は焼成時間が長くなるほど大きくなり、その度合いは安山岩では小さく、硬質砂岩では顕著となった。また、両岩種の焼成時間に対する吸水率ならびに絶乾比重は、硬質砂岩では焼成時間が長くなるほど吸水率は低下し、絶乾比重は増加したが、安山岩ではいずれの物性とも焼成時間による有意な差異は認められなかった。

本節では、粘土試料で予測した乾式プレス法の作製条件をダスト試料で検証したが、いずれの材料の試験片とも圧縮強度の最大値ならびに吸水率の最小値は成型圧が147MPa、焼成温度が1,100℃の場合となり、また焼成時間は3時間でも十分な強度を有する試験片となる硬質砂岩の結果を勘案して、ダスト焼成人工骨材の作製条件は、成型圧147MPa、焼成温度1,100℃、焼成時間3時間とした。

4. 3 ダスト焼成人工骨材におけるダスト粒度の影響

図7は、成型圧を147MPa、焼成温度を1,100℃、焼成時間を3時間として作製した硬質砂岩および安山岩ダストの粒度0.3mm、0.04mm焼成ダスト試験片の圧縮強度、吸水率ならびに絶乾比重を比較したものである。ダスト粒度の違いによる圧縮強度は、両岩種とも0.3mmよりも0.04

mmの方が大きくなり、その差異は硬質砂岩では1.6倍、安山岩では2.6倍となった。岩種間に見られるこれらの差異は現段階では不明であるが、ダスト粒度の小さい焼成試験片ほど強度が増すということは、より小さい粒度ほど熱影響を受け易いことから理解される。しかし、強度的には0.3mm粒度でも硬質砂岩のように十分な強度を持ち、また実際の篩い分け作業の簡便さ等を考慮すると、ダス

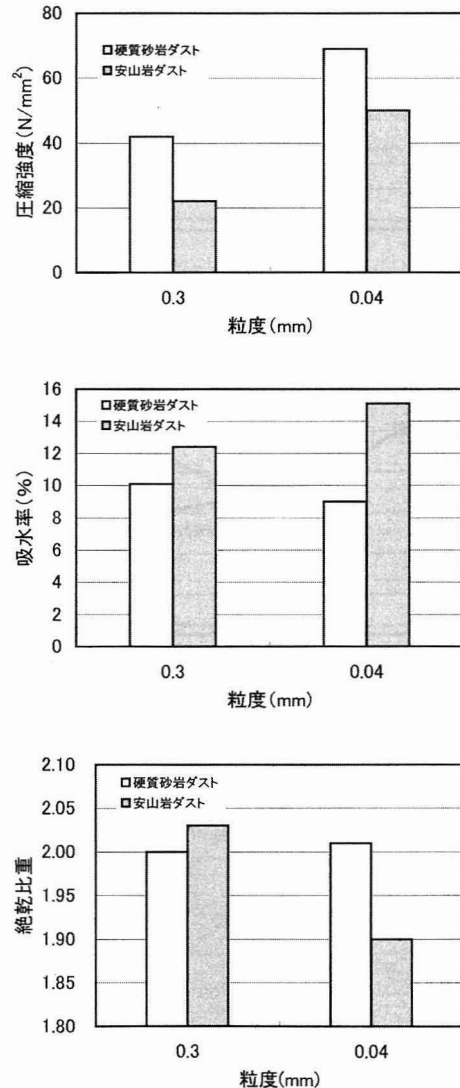


図7 焼成ダスト試験片の物性に及ぼすダスト粒度の影響 (成型圧147MPa、焼成温度1,100℃、焼成時間3 hours)

ト焼成人工骨材の作製におけるダスト粒径は0.3mm で良いと判断される。

次に、ダスト粒度による吸水率ならびに絶乾比重の関係を見ると、硬質砂岩の両物性には有意な差異は認められないが、安山岩ではより微粒な試験片ほど吸水率が増大し、絶乾比重が低下するという結果となった。これは強度の見地からすると矛盾するが、粉体によって異なる圧密度の難易さが一つの要因と考えられる。すなわち、一定量、一定プレス圧における硬質砂岩と安山岩の圧密度は、前者に比べ後者の方が低くなり、結果として安山岩ダスト試験片では体積が大きくなり、空隙率も大きくなったものと考えられる。この関係を図示したのが図8である。図8より、ダスト粒度と有効空隙率の関係を見ると、圧密度の高い硬質砂岩ではダスト粒径が小さくなると有効空隙率は減少し、圧密度の低い安山岩ではダスト粒径が小さくなると有効空隙率は増大した。

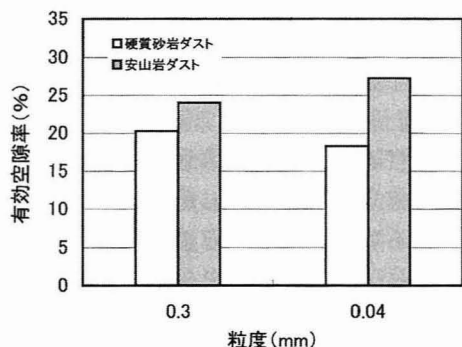


図8 焼成ダスト試験片のダスト粒度と有効空隙率の関係 (成型圧147MPa、焼成温度1,100℃、焼成時間3 hours)

4. 4 ダスト焼成人工骨材における粘土配合比の影響

図9は、成型圧を147MPa、焼成温度を1,100℃、焼成時間を3時間として作製したダスト粒径0.3mmの硬質砂岩および安山岩のダストに対する粘土の割合と圧縮強度、吸水率ならびに絶乾比重との関係を示したものである。硬質砂岩の圧縮強度には多少のばらつきが認められるが、両岩種とも粘土配合比が増すにつれて強度は増大し、安山岩では特に顕著な粘土のバインダー効果が認められた。一方、吸水率および絶乾比重は、両岩種とも粘土の配合による差異はそれほど現れなかった。

以上の結果から、中心原料となるダストを多く含み、かつ強度がJIS A 5002の最高区分(40N/mm²)を満足させることを基準に最小粘土配合比を判断すると、硬質砂岩では10%、安山岩では30%と判定された。また、同粘土配合比における両岩種の吸水率ならびに絶乾比重を見ると、硬質砂岩はそれぞれ10.1%、2.03、安山岩は10.8%、2.04となり、吸水率は通常的人工骨材に比べ高

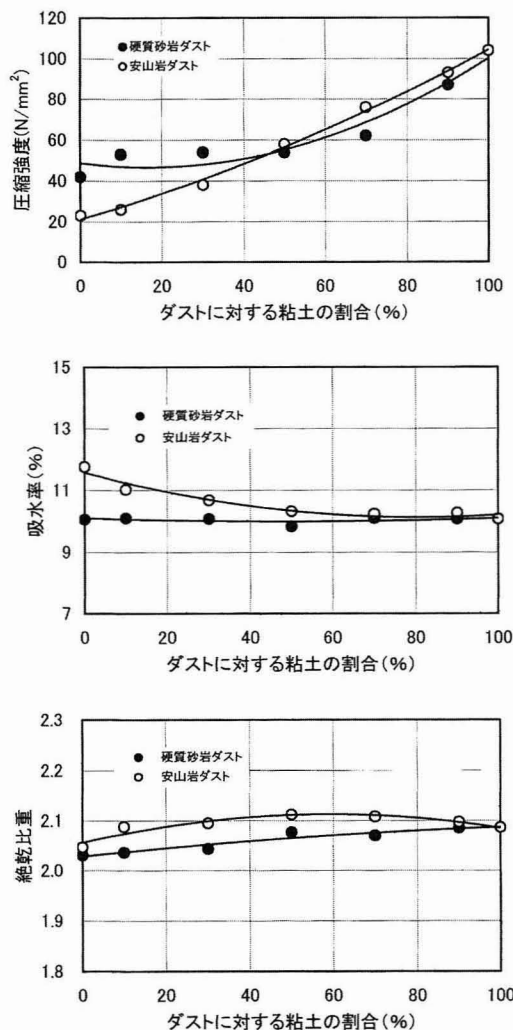


図9 ダスト / 粘土配合試験片の物性に及ぼす粘土比の影響 (ダスト粒度0.3mm、粘土粒度0.04mm、成型圧147MPa、焼成温度1,100℃、焼成時間3 hours)

(24)

めとなっているものの、絶乾比重はJIS A 5002の「2.0未満」および建築学会の「2.0以下」規準を概ね満足した。

図10に試作した粘土配合比10%の硬質砂岩ダスト焼成人工骨材を示す。

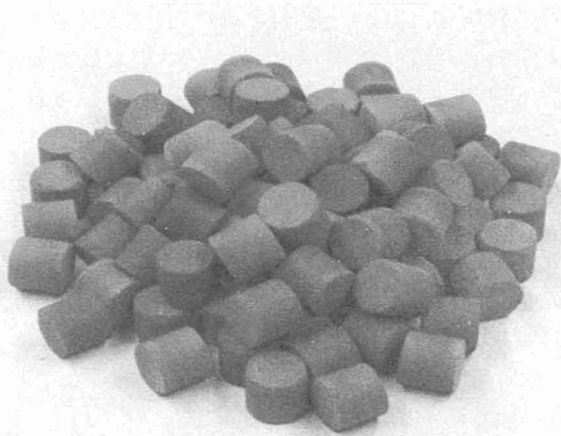


図10 粘土配合比10%の硬質砂岩ダスト焼成人工骨材

5. おわりに

本研究では、未利用碎石副産物の有効利用の観点から、粘土ならびに硬質砂岩および安山岩のダストを対象として、乾式プレス法におけるダスト焼成人工骨材の作製条件および岩種毎の最小粘土配合比を検討した。得られた結果を要約すると以下のようになる。

- 1) 乾式プレス法におけるダスト焼成人工骨材の作製条件は、成型圧147MPa、焼成温度1,100℃、焼成時間3時間が妥当であると判定された。
- 2) ダスト焼成試験片の圧縮強度に及ぼすダスト粒度の影響は、岩種に関わらず0.3mmよりも0.04mmと微粒なほど大きくなるが、実際の使用においては、0.3mmダストでも粘土の配合によって、十分に強度の改善が図られることが示唆された。
- 3) JIS A 5002の強度の最高区分を満足させるダスト焼

成試験片の最小粘土配合比は、硬質砂岩では10%、安山岩では30%となった。

最後に、本研究を遂行するにあたり、試料作製と各種試験に従事した吉田真也（日本海上工事(株)）と大越政寛（袴田司法書士事務所）の両氏に謝意を表す。また、碎石試料の提供を頂いた蒲野建設(株)蒲野秀雄氏と（株）遠忠の遠藤忠志氏、原石山の調査に貴重なアドバイスを頂いた日本碎石協会東北地方本部専務理事高橋幸悦氏ならびに岩手県採石工業組合事務局長高橋信也氏の諸氏には、厚く謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) <http://www.saeseki.or.jp/JYUKYU2002>. TIT
- 2) 前田貴史・青山 誠：第27回全国碎石技術大会資料、pp. 63 - 66 (2000)
- 3) 年岡哲郎：第27回全国碎石技術大会資料 pp. 67-72 (2000)
- 4) 古住光正、阿部正良、加賀谷 俊、蒲野秀雄：2003 資源・素材春季大会講演集、pp. 105 - 106 (2003)
- 5) 古住光正、阿部正良、大越政寛、蒲野秀雄：2004 資源・素材春季大会講演集、pp. 43 - 44 (2004)
- 6) 古住光正、阿部正良：資源・素材秋季大会企画発表資料、pp. 17-20 (2004)
- 7) B. 3, 8, 12 : Determination of Aggregate Crushing Value (1960)
- 8) 近藤泰夫訳：土木材料便覧 (Materials Testing Procedures Manual, Bureau of Reclamation)
- 9) 山口梅太郎、宮崎道雄：日本鉱業会誌、86巻、986号、pp. 346-351 (1970)