

論文 建設汚泥を利用した人工軽量骨材コンクリートに関する研究

江本幸雄^{*1}・大和竹史^{*2}・添田政司^{*3}・牛尾和之^{*4}

要旨：建設工事に伴い発生する建設副産物の量は年々増加し、その対策として再生利用の促進が図られているが、中でも取り扱いが困難な汚泥の再利用の促進が強く求められている。本研究では、掘削土から再生砂を製造する際に排出される建設汚泥を焼成した人工軽量骨材を試作し、コンクリート用粗骨材としての性質およびコンクリートとしての適用性について検討を行ったものである。その結果、汚泥を1100℃で30分焼成した人工軽量骨材は市販の軽量粗骨材と同等の物理的性質が認められ、コンクリート用粗骨材としても十分活用できることが明らかとなった。

キーワード：建設副産物、人工軽量骨材、リサイクル、汚泥、焼成

1. はじめに

近年、都市再開発や地下空間の利用などの建設工事に伴う建設副産物は、年々増加しているが、中でも含水率が高く取り扱いが困難な建設汚泥は大半が有効利用が図られず最終処分場へ投棄されているのが実状である[1]。しかしながら、環境保全等により都市部では処分場が不足しており、その距離も遠隔化し、海洋投棄も禁止を迫られるなど再資源化が強く求められている。汚泥の有効利用の方法としては固化、溶融、焼成などによる建設材料への利用が考えられる[2][3][4]。最も簡単な方法として固化処理し埋戻し材や盛土材に用いる方法が行われているが、再利用率は10%程度である。そこで、本研究では、建設汚泥の中でも有害物を含まない汚泥を対象とし焼成による軽量骨材の製造を試みた。現在、再資源化の一環として砂質系の建設発生土を水洗いし再生砂を製造することが行われているが、その際に排出される汚泥の脱水ケーキを造粒、焼成し軽量骨材を製造し、その物理的性質およびコンクリート用粗骨材としての適用性に関する検討を行った。

2. 実験概要

2. 1 軽量骨材の原料と製造

軽量骨材の原料として用いた建設汚泥は、ベントナイト液などを含まない掘削土を水洗いし、フィルタープレスにより減量化した含水率35%程度の脱水ケーキである。脱水ケーキの化学

表-1 汚泥の化学組成

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	LOI	合計
53.8	20.5	7.6	1.7	2.0	0.1	1.6	2.1	0.9	0.1	0.2	9.8	100

*1 福岡大学助教授 工学部土木工学科、工博（正会員）

*2 福岡大学教授 工学部土木工学科、工博（正会員）

*3 福岡大学助手 工学部土木工学科、工博（正会員）

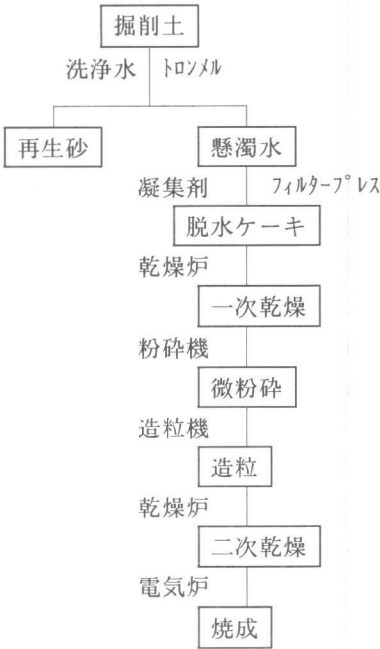
*4 樋口産業（株）

組成を表－1に示す。主要な化学成分は、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 であり強熱減量は9.8％と比較的粘土に近い性質を有している。骨材の製造フローを図－1に示す。骨材の製造は、まず掘削土を洗浄し再生砂を採取した後の脱水ケーキを110℃で炉乾燥し、ロサンゼルス試験機で微粉碎した。次に、予備試験で得られた造粒に適する含水率25％に調整し、造粒機（オムニミキサーで代用）で水を加えながら4分間の造粒を行った後、焼成時の爆裂を防ぐため再度110℃で乾燥した[5]。その後、電気炉で焼成温度1100℃、焼成時間を10～60分に変化させて焼成を行った。焼成温度を1100℃としたのは、1000℃では骨材内部の焼成が不十分で発泡が起こらず1200℃では溶融が生じるためである[6]。

2. 2 実験概要

焼成した人工軽量骨材の物理的性質として比重、吸水率、単位容積質量、破碎値などについて市販骨材との比較検討を行った。また、コンクリートの実験においては、使用材料としてセメントは普

通ポルトランドセメント（比重3.15）、細骨材は海砂（比重2.60）、粗骨材は本焼成骨材と市販の造粒および非造粒軽量骨材を用いた。コンクリートの配合は、単位セメント量を 350kg/m^3 、スランプおよび空気量はそれぞれ8cmおよび4.5％を目標として打設した。コンクリートの配合を表－2に示す。なお、強度用の供試体は $\phi 7.5 \times 15\text{cm}$ を用い水中養生を行った後、所定の材令で強度試験を行った。コンクリートの強度以外の性質として乾燥収縮、耐熱性、耐凍害性、透水性についても検討を行った。乾燥収縮試験は、JIS A 1129 によるコンタクトゲージ法で行った。耐熱性試験は、105℃の予備乾燥の後、電気炉により200、400、600 および800℃で3時間加熱を行い、徐冷後圧縮強度試験を実施した。耐凍害性試験は、 $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ の角柱供試体を用い、ASTM C 666A



図－1 骨材の製造フロー

表－2 コンクリートの配合表

骨材	スランプ ^o (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
					W	C	S	G	減水剤	A E 剤
試作 軽量	10.5	4.1	42	40	148	351	728	546	3.51	—
	8.6	3.9	41	40	145	352	732	549	3.52	—
	9.3	4.5	40	42	140	350	769	531	3.50	0.63
市販 A	7.3	4.0	43	40	152	352	725	585	3.52	—
	5.6	3.7	42	40	148	353	731	590	3.54	—
	8.1	4.3	42	42	147	351	763	567	3.51	0.53
市販 B	8.2	4.0	42	40	148	352	729	659	3.52	—
	9.6	4.4	40	42	140	350	770	642	3.50	0.53

法に準じて水中凍結水中融解試験を実施し、たわみ振動による一次共鳴振動数および質量を測定した。透水試験は、 $\phi 15 \times 30\text{cm}$ の中空円筒供試体を用いて材令 28 日において水圧 5 kgf/cm^2 、透水時間 48 時間として実験を行い、平均浸透深さから拡散係数を算出した。

3. 実験結果および考察

3. 1 軽量骨材の物理的性質

表-3 は、軽量骨材の物理的性質を示したものである。1100℃で 30 分焼成して製造した軽量骨材は市販の 2 種類と比べ 24 時間吸水率は小さいものの比重はやや小さな値を示している。また、実積率は 67.5% と若干大きい値が得られている。一方、BS 規格による 40tf 破砕値は 39.8%、10% 破砕荷重は 9.0tf、点

表-3 軽量骨材の物理的性質

種類 試験項目	本軽量骨材	市販骨材 A	市販骨材 B
	造粒型	非造粒型	造粒型
絶乾比重	1.20	1.27	1.38
24 時間吸水率 (%)	7.92	10.24	13.48
表乾比重	1.30	1.40	1.57
単位容積質量 (kg/l)	0.81	0.83	0.85
実積率 (%)	67.5	65.4	61.6
40tf BS 破砕値 (%)	39.8	35.5	35.4
10% BS 破砕荷重 (tf)	9.0	12.4	10.8
点載荷圧裂試験 (N/mm ²)	4.5	—	6.0

注) 市販骨材 A は膨張頁岩系骨材、市販骨材 B はフライアッシュ焼成系骨材

載荷強度[7]は 4.5 N/mm^2 程度で骨材の強度としては市販骨材に比べやや劣るようである。図-2 は、焼成温度 1100℃、焼成時間 10~60 分で製作した骨材の吸水率と経過時間との関係を示したものである。焼成時間 10 分では、吸水開始 1 分後の吸水率は高く 72 時間吸水の 70% が終了しているが、これは、まだ焼成が不十分であり緻密な発泡体となっていないためと考えられる。焼成時間が 20 分以上になると吸水開始 1 分後の吸水率はいずれも低い値を示しており、72 時間吸水率は 10 分焼成時の場合の 6 割程度の値となった。また、同時に測定した表乾比重は焼成 10 分で 1.8、20 分で 1.6、30~60 分では約 1.3 程度であった。焼成温度 1000℃ においても同様な試験を実施したが焼成が不十分なためか焼成時間にかかわらず吸水率は 20% 程度、表乾比重は 2.0 程度であった。

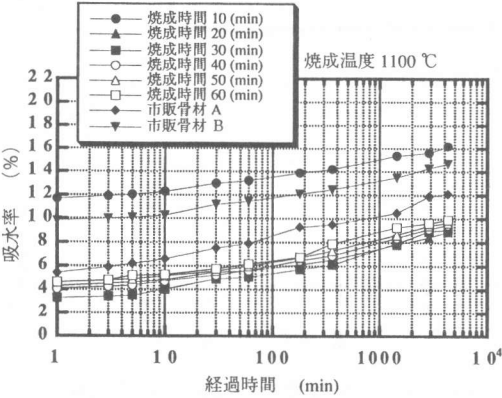


図-2 吸水率の経時変化

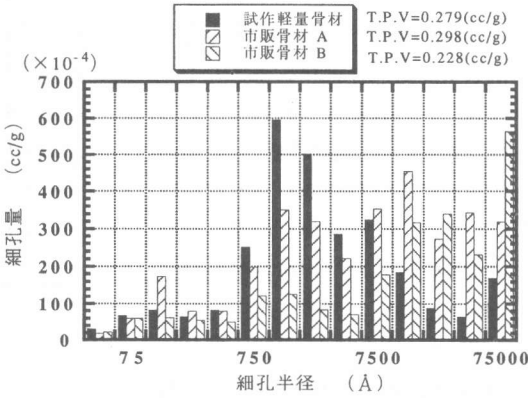


図-3 骨材の細孔径分布

図-3は、焼成温度1100℃、焼成時間30分で製造した骨材と市販骨材について水銀圧入ポロシメーターにより細孔径分布および総細孔容積を示したものである。試作骨材の総細孔量は、市販骨材AとBの間にあるものの750~7500Åの細孔半径の細孔量が特に多く、7500~75000Åの半径のそれは少なくなっていることから、発泡した骨材の気泡組織の緻密さが低比重、低吸水性に関係しているものと考えられる。骨材の物理試験の結果から、コンクリートの試験に用いる軽量粗骨材は、焼成温度1100℃、焼成時間30分で製造したものを使用した。

3. 2 コンクリートに関する実験

1) 強度

コンクリートの圧縮強度試験結果および圧縮強度と引張強度との関係を図-4、5にそれぞれ示す。試作骨材を用いたコンクリートの圧縮強度は、NonAEおよびAEコンクリートとも非造粒型の骨材Aを用いた場合よりもやや小さいが、骨材Bの場合とほぼ同程度の値を示している。また、3種類の骨材を用いたコンクリートの圧縮強度と引張強度との関係はほぼ直線関係にあり、圧縮強度に対する引張強度の比率は1/11~1/12程度であり、通常用いられる膨張頁岩や焼成フライアッシュから製造された軽量コンクリートの値と同程度であった[8]。

2) 乾燥収縮

図-6、7は、室温20℃、湿度60%の乾燥収縮試験における長さ変化率と質量減少率を示したものである。各骨材を用いたコンクリートとも材令200日においても、まだ乾燥収縮は終了しておらず増加する傾向が認められる。汚泥を焼成した軽量骨材の長さ変化率は同配合の造粒型軽量骨材Bと比較した場合、材令200日においてAEコンクリートで 180×10^{-6} 、NonAEコンクリートで 150×10^{-6} 程度小さい値となった。一方、試作

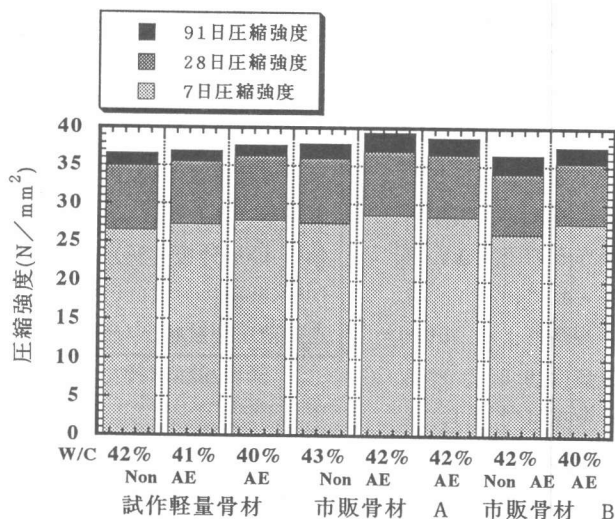


図-4 圧縮強度試験結果

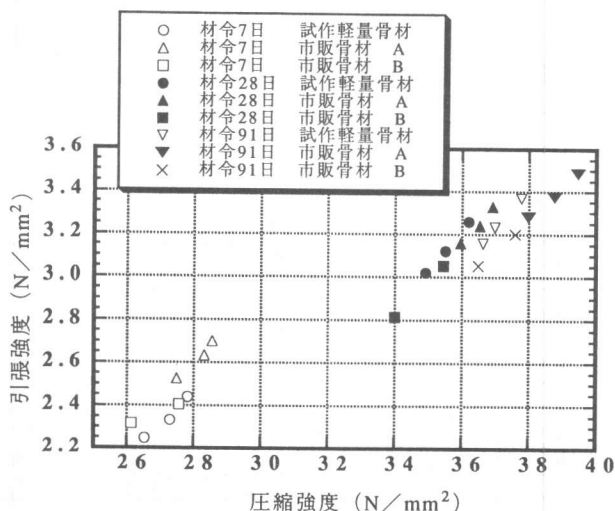


図-5 圧縮強度と引張強度との関係

骨材の質量減少率は、3.5 %前後であり、市販軽量骨材コンクリートの50～70 %の値である。これは、試作骨材自体の吸水率が他の骨材より小さいことと細孔径分布から明らかに骨材構造の緻密さが影響しているものと考えられる。

3) 耐熱性

図-8は、耐熱性試験後の圧縮強度残存率を示したものである。各骨材を用いたコンクリートの強度残存率は加熱温度が高くなるとともに急激に低下し、800℃では10～30%程度になった。同一セメント比の配合では試作骨材の方がやや大きい残存強度を示している。また、静弾性係数残存率も同様な傾向が認められた。

4) 耐凍害性

図-9は、凍結融解サイクル数と相対動弾性係数との関係を示したものである。非造粒型の市販骨材Aが最も相対動弾性係数の低下が早く、市販骨材B、試作骨材の順に低下しており300サイクルまでに全ての種類において相対動弾性係数は60%以下となり、耐凍害性は認められなかった。最も耐凍害性のある試作骨材を用いたAEコンクリートにおいても耐久性指数は5.6しか得られなかった。市販品についてはプレウエッティングした軽量骨材を用いたコンクリートのA法による凍結融解試験で一般的にみられる結果とほぼ同様の結果であり、試作品はそれより良好な結果が得られた。

5) 透水性

図-10は、各軽量骨材コンクリートの透水試験の結果である。試作軽量骨材の拡散係数は、 $3.5 \sim 4.1 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 程度で市販骨材の場

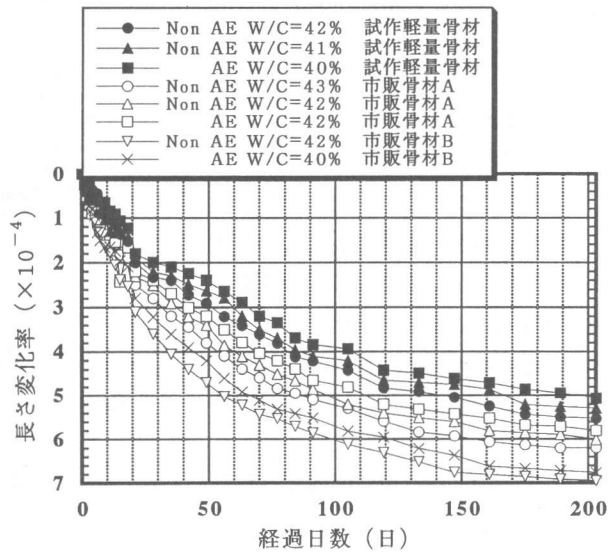


図-6 乾燥収縮による長さ変化率

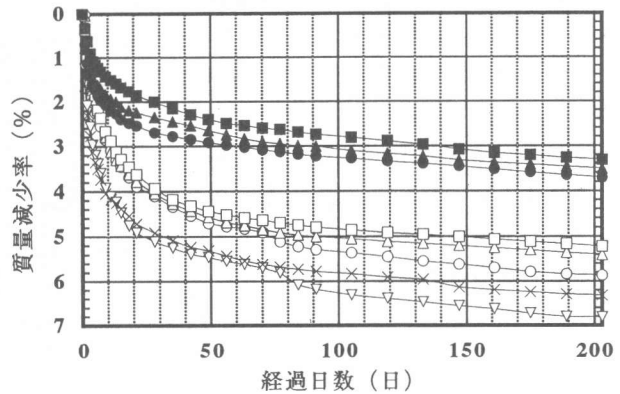


図-7 質量減少率

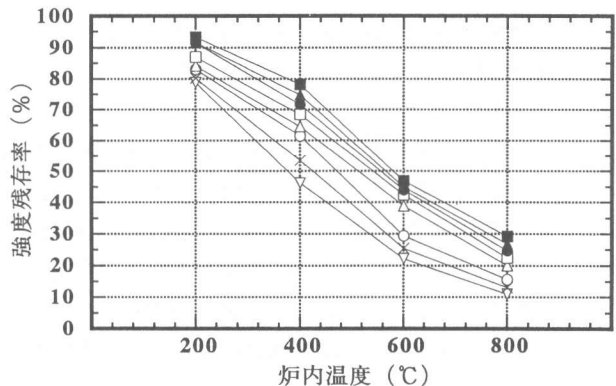


図-8 耐熱性試験による圧縮強度残存率

合よりやや良好な水密性が認められた。

4. まとめ

本実験で得られた結果をまとめると以下のとおりである。

1) 建設副産物から生じる脱水ケーキの乾燥、微粉碎、造粒を行った結果、含水率25%が最適造粒条件であり、骨材の物理試験から判断すると焼成温度1100℃、焼成時間30分が最適焼成条件である。

2) 汚泥を1100℃で30分焼成して製造した軽量骨材は、市販骨材とほぼ同等の物理的性質を有することが明らかとなった。

3) 建設汚泥から製造された軽量骨材をコンクリートの粗骨材として用いた場合、強度、乾燥収縮、耐熱性、耐凍害性、水密性等の硬化コンクリートの性質は市販軽量骨材を用いた場合と同等の性質を有しており、建設汚泥はコンクリート用粗骨材として再資源化できることが明らかとなった。

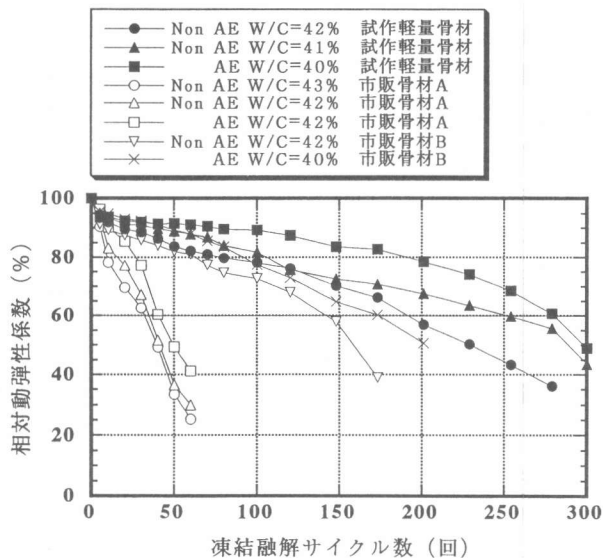


図-9 凍結融解試験結果

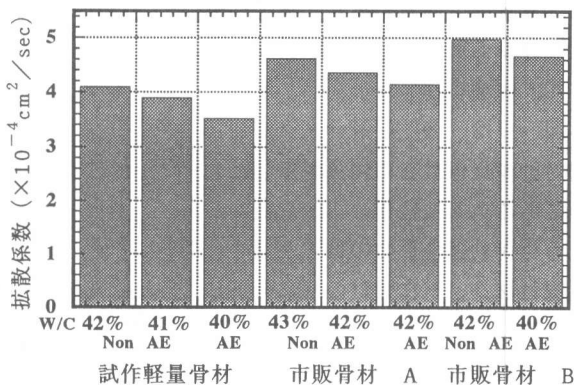


図-10 透水試験結果

参考文献

- [1] 総合的建設副産物対策：建設副産物リサイクル広報推進会議、1995
- [2] セメント協会編：セメント系固化材による地盤改良マニュアル、1994
- [3] 川地武、小川伸吉、磯陽夫：建設泥土を原料とする焼成物の試作、第5回廃棄物学会研究発表会講演論文集、pp. 200～202、1994
- [4] 重富秀樹、江本幸雄、大和竹史、牛尾和之：建設汚泥を利用した試作軽量骨材の性質に関する研究、土木学会第51回年次学術講演会概要集 第7部、pp. 246～247、1996. 9
- [5] 日本粉体工業技術協会編：造粒ハンドブック、pp. 713～720
- [6] 重富秀樹、江本幸雄、大和竹史、添田政司：建設汚泥を利用した人工軽量骨材の性質に関する研究、平成7年度土木学会西部支部研究発表会概要集、pp. 906～907、1996. 3
- [7] 土質工学会編：岩の調査と試験、pp. 293～298
- [8] セメント協会編：人工軽量骨材コンクリート特集、セメントコンクリート、No. 259、1968