

下水汚泥焼却灰を用いた空洞充填材の強度特性

飛島建設
ダイヤコンサルタント
飛島建設
飛島建設

正会員
正会員

○坂本昭夫
橋本雅宏，金住健一
杉浦乾郎，石合伸幸
岩城圭介，山田紀利

1. はじめに

東海地方では垂炭廃坑の陥没や沈下などの災害対策として、空洞内にスラリー状の充填材を注入・固化させて地盤の安定を図る空洞充填工事が施工されている。スラリーは近郊の碎石工場で副生する脱水粘土（粘土キラ）と珪砂工場の珪砂選別残渣（砂キラ）に固化材・水を混練りしたものである。従来はこの東海地方で発生するキラが用いられてきた（キラ充填材）が、筆者らは材料選定の自由度を高めることを目的に、あらたなりサイクル材料を用いた充填材の研究を行った。ここでは、下水汚泥焼却灰（以下、焼却灰とよぶ）を用いた充填材の配合試験を行い、その強度特性について検討した成果の概要を報告する。

2. キラ充填材の標準配合と品質目標

キラ充填材の標準配合を表-1に、品質目標値を表-2に示す¹⁾。充填工事では施工性に関係する充填材の流動性をフロー値で管理し、材料の分離抵抗をブリーディング率で管理する。一軸圧縮強度の目標値は上部地盤崩壊領域の土塊による鉛直土圧を支持するために設定された値である。

3. 焼却灰を用いた充填材の配合試験

下水処理場では、流入する有機物や土砂分、生物処理により過剰になる活性汚泥が混在した下水汚泥が発生する。下水汚泥は減容化、安定化を目的に焼却され、灰として処理されることが多い。焼却によって有機分は燃焼してしまうため、灰中に残るのは汚泥中の無機分と脱水工程において添加される凝集剤中の無機分である。凝集剤は消石灰と塩化第二鉄を用いる石灰系（無機系）および高分子を用いる高分子系に大別され、焼却灰の成分および性状に大きな影響を与える。表-3に配合試験に用いた焼却灰の成分分析結果を示す。石灰系焼却灰は

消石灰を大量に使用するため、酸化カルシウムの含有率が非常に高い。高分子系焼却灰は有機系の高分子凝集剤を使用するため、もともと汚泥に含まれていた無機分ケイ素、アルミニウム、リンの含有量が多い。

表-4に代表的な配合と一軸圧縮試験結果の一例を示すが、試験結果が表-2の目標値50kN/m²以上を満足することを条件とした。なお、表中の調整材とは、焼却灰のよ

表-1 キラ充填材の標準配合 (m³あたり)

粘土キラ	(kg)	400
砂キラ	(kg)	200
固化材	(kg)	50
水	(l)	759

表-3 下水汚泥焼却灰の成分分析結果

	石灰系 焼却灰	高分子系 焼却灰
SiO ₂	16.12	32.29
Al ₂ O ₃	6.03	19.88
Fe ₂ O ₃	10.8	7.88
CaO	43.74	8.4
MgO	1.93	2.46
Na ₂ O	0.39	1.06
K ₂ O	0.38	1.83
P ₂ O ₅	7.29	19.3
lg.loss	5.19	2.9

表-2 充填材の品質目標値

品質項目	目標値	備 考
フロー値	9～14秒	ブレバククトコンクリート P ロート
ブリーディング率	3%以下	メスシリンダーまたはビニール袋
一軸圧縮強度	50kN/m ² 以上	標準水中養生日数 28 日 (φ=5cm, h=10cm標準)
	20kN/m ² 以上	空洞充填物の不攪乱試料
有害物質分析	定量基準以下	主材料全部

表-4 配合と強度試験結果の例

焼却灰の種類	単位量				S/(S+K) (%)	C/W (%)	W/C (%)	圧縮強度 (kN/m ²)
	母 材		固化材C (kg/m ³)	水 W (l /m ³)				
	焼却灰S (kg/m ³)	調整材K (kg/m ³)						
石灰系(乾燥灰)	175	325	80	779	35.0	10.26	973.8	79
石灰系(20%加湿灰)	175	325	80	779	35.0	10.26	973.8	373
高分子系(乾燥灰)	114	456	100	751	20.0	13.32	751.0	147
品質目標値								50以上

(注)調整材：粘土キラ

うな比較的単一粒径の材料を用いた場合の材料分離を防ぐ目的で同時に配合する材料のことをいう。

焼却灰を用いた充填工事を行う場合、取扱いの関係で、乾燥状態の灰を適度な含水状態にすることが想定される。石灰系焼却灰の場合、この加湿によって含有する酸化カルシウムなどが水和反応により固化する傾向がある。固化の程度によっては充填材として混練りする前にほぐす必要があるが、このような性状の変化が充填材に与える影響を把握する必要がある。図-1に加湿した石灰系焼却灰の強度増進の様子を表す。図-2に石灰系焼却灰による充填材のセメント水比(C/W)と一軸圧縮強度(q_u)の関係を示す。図より、C/Wと q_u の関係は高い相関を示した。また加湿灰は乾燥灰に比べて、いずれの含水比の場合でも高い強度であった。なかでも含水比20%の場合が、50%、80%の場合より高い値を示した。これは、灰の加湿の際、含水比が大きいほど水和による固化が著しいことから、混練り前のほぐしの程度が強度に影響したためと思われる。図より、目標値 $q_u \geq 50 \text{ kN/m}^2$ を満足するC/Wは、乾燥灰では9%程度以上、加湿灰では6%程度以上となり、石灰系焼却灰では少量の加湿が有効といえる。

次に、図-3に高分子系焼却灰の各材齢ごとのC/Wと q_u の関係を示す。高分子系についてもC/Wとの高い相関が確認できた。しかし、図-4に示すように、材齢に応じた強度変化をみた場合、配合によっては強度発現の傾向に差異がみられた。すなわち、固化材が $C=150 \text{ kg/m}^3$ および 120 kg/m^3 と多い場合は材齢に応じた強度増加がみられるが、 $C=60 \text{ kg/m}^3$ と少ない場合は3日以降の強度が低下したままのものが多かった。その中間の $C=100 \text{ kg/m}^3$ では、順当に強度増加するものと3日以降に強度低下した後再び増加に転じるものに分かれた。前者は焼却灰の単位量 S が $S=114 \text{ kg/m}^3$ 、後者は $S=171 \text{ kg/m}^3$ のものである。高分子系焼却灰は先に述べたようにリンの含有量が多い。一般にリン酸塩はセメントの凝結を遅延し、硬化を妨げる成分として知られている。²⁾ここでの強度発現阻害もリン含有量が多いことに原因があると考えられる。図-5は $C=100 \text{ kg/m}^3$ に対して $S=114 \text{ kg/m}^3$ と焼却灰の単位量を比較的少なくした配合の長期強度の試験結果で、順当な強度発現がみられた。以上により、リンによる強度発現阻害は適切な配合の選定で回避できると考えられる。

4. まとめ

下水汚泥焼却灰を用いた充填材の強度特性は、その処理工程に大きな影響を受ける。すなわち、石灰系では含水比20%程度の加湿で大きな強度促進を図ることができる。また高分子系のようなリン含有量が多いものは、強度発現が阻害される可能性があり注意が必要である。これには固化材単位量を多くするかまたは焼却灰単位量を低めに抑える必要がある。

下水汚泥の発生量は下水道普及率の向上、水処理の高度化、合流式下水道越流水の改善などにより今後さらに増加すると予想され、本研究のような有効利用分野の開拓が望まれる。

なお、研究に際しては関係者の方々にご協力と貴重なご助言をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献 1) 日本充てん協会編：改訂版 空洞充填施工マニュアル，2004.11.

2) 川島，森田：下水汚泥焼却灰の有効利用技術，土木技術資料，42-10，pp.42-47，2000.10.

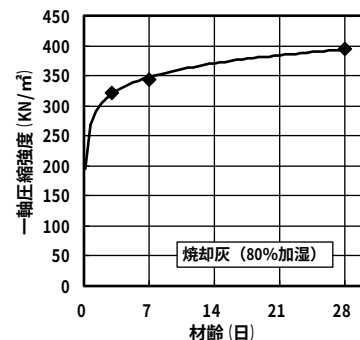


図-1 焼却灰の加湿後の強度 (石灰系)

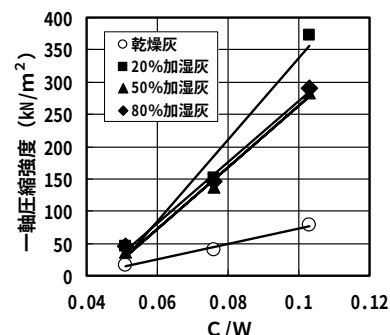


図-2 C/W と強度の相関 (石灰系)

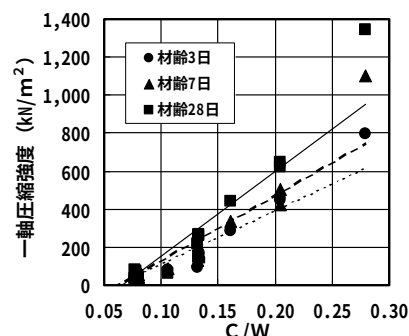


図-3 C/W と強度の相関 (高分子系)

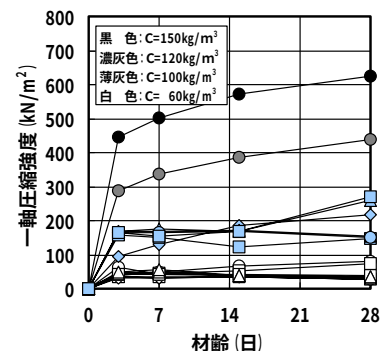


図-4 材齢と強度 (高分子系)

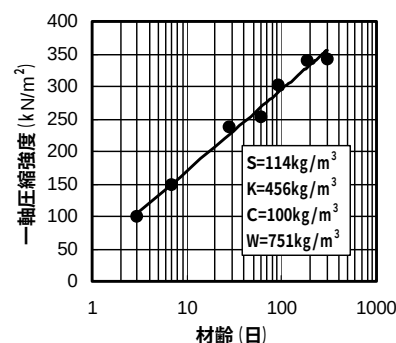


図-5 長期材齢と強度 (高分子系)