

シャモットを活用した下水道管の強度性状

河合 糺茲 (土木工学科)

1. 序論

資源の枯渇化が進行しているにも関わらず、再生資源の有効利用は立ち遅れている。特に、地場産業から排出される煉瓦、陶器、瓦などのセラミック廃棄物は基より、一般家庭から排出されるセラミック廃棄物は、ガラス類の廃棄物と混在して排出されることが多く、その大部分は埋め立て処理されているのが実情である。このような背景から本報告は、セラミック廃棄物の再生資源の有効利用として、地場産業から排出されるセラミック廃材、一般家庭から分別排出されたセラミック廃材を（社）土木学会、コンクリート標準示方書に準拠し、粒度 0～15mm に破碎したシャモットを、鉄筋コンクリート管の細・粗骨材として利用した。シャモットを細・粗骨材として、成形した鉄筋コンクリート管の機械的性質は、（社）日本下水道協会、下水道施設計画・設計指針と解説設に定められている機械的性質を十分に満足すると共に、セラミック廃材のゼロエミッション化への一助となることが認められた。

2. 実験概略

2.1 シャモット

シャモットは、一般的に微粉末状で水質浄化に使用しているが、取り扱いが容易であれば大量使用につながることから、ゼロエミッション化実現への一助となる。このような観点から、写真-1に示すように建設副産物として中間処理場に集積されたセラミック廃材を土木学会コンクリート標準示方書に準拠し、写真-2に示すようにコンクリートの骨材粒度 0～15mm に破碎し



写真-1 分別収集されたシャモット



写真-2 破碎されたシャモット

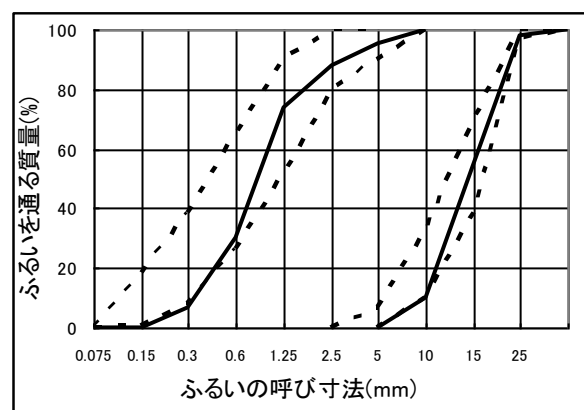


図-1 シャモットの粒度曲線

た。その粒度曲線を図-1に示す。シャモットの破碎粒径を 0～15mm としたのは、取り扱い利便性を優先することによって、リサイクル化が容易に出来ると考えた。

シャモットの物理的性質は表-1 に示す通りである。表-1において、吸水率が通常の碎石より大きいのは、シャモットの気孔に起因している。すなわち、本実験で使用した碎石の細孔容積は $0.016860\text{cm}^3/\text{g}$ であるのに対して、シャモットは $0.000734\text{cm}^3/\text{g}$ と碎石より約 10^{-2} も小さいことと、細孔が無数に存在していることに因ると推察される。

2.2 シャモット砂および標準砂モルタル供試体による強度性状および腐食性状

シャモットモルタルの強度性状および腐食性状を調べる目的で、JIS R 5201 のセメント強さ試験に準拠し、シャモット砂（以後シャモットと略記）および山口県豊浦産標準砂（以後標準と略記）を用いたモルタル供試体を作製し、圧縮強度試験および曲げ強度試験を行うと共に、大学校内の下水道施設で腐食暴露試験を行った。

2.3 シャモットコンクリートの配合設計

シャモットの物理性状、シャモットモルタル供試体の強度性状および腐食性状の試験結果から、シャモットはコンクリートの細・粗骨材として活用できるものと推察される。そこで、(社)日本下水道協会、JSWAS A-1およびJSWAS A-6の強度性状を参考にして、シャモットコンクリートの試練りを繰り返し行い、表-2 に示すシャモットコンクリートの配合を決定した。表-2 の配合に基づいたシャモットコンクリートの練り上がり状態を写真-3 に示す。シャモットコンクリートの練り上がり状態から、鉄筋コンクリートの製管は十分に行えると判断し製管を決断した。

2.4 シャモット鉄筋コンクリート管の強度性状

製管したシャモットコンクリートは、(社)日本下水道協会、下水道施設計画・設計指針と解説に定められている強度性状試験を行った。下水道管に要求される強度は、施工方法によって強度性状が異なる

表-1 シャモットの物性

	細骨材	粗骨材
密度(g/cm ³)	2.4	2.4
給水率(%)	4.4	5.2
素粒率(%)	4.17	6.22

表-2 シャモットコンクリートの配合表

水セメント比 W/C (%)	単 位 量 (kg/m ³)				混和剤
	水	セメント	シャモット		
	W	C	細骨材	粗骨材	
68.3	329	482	1590		0
51.9	250	482	955	635	0



写真-3 シャモットコンクリートの練り上がり状態

が、本報告では JSWAS でそれぞれ要求されている圧縮強度、外圧圧縮強度および曲げ強度の静的試験結果を主に述べるが、外圧圧縮強度については、土被りを考慮した繰り返し外圧圧縮強度性状についても述べる。

2.4.1 外圧圧縮強度試験

外圧圧縮強度試験は、写真-4 に示すように JSWAS A-1 および JSWAS A-6 に準拠した静的な外圧圧縮試験方法とした。載荷速度に関しては特に規定していないことから、コンクリートの割裂引張強度試験方法に準拠し、圧縮応力度の増加率が毎秒 $0.06 \pm 0.04\text{N}/\text{mm}^2$ となるように調整し、最大荷重に至るまでその増加率を保持して載荷し

た。

2.4.2 土被りを考慮した繰り返し外圧圧縮強度試験

国土交通省の道路下空間を利用した浅埋設下水道管指針では、道路表面の舗装状態および交通事情によって、敷設された下水道管伝達される活荷重応力分が相違することが予測される。また、マンホール周辺部の道路表面舗装破壊によって、活荷重の応力伝達は複雑多岐に及ぶものと推察される。したがって、下水道管の敷設状態による繰り返し活荷重の影響を試験することは重要である。

試験は写真-5に示すように、鋼製ボックス中に(社)日本道路協会示方書に準拠し路床を築き、その路床上にJSWAS A-6で規定されている推進管、呼び径 $\Phi 250\text{mm}$ 、長さ $L 1000\text{mm}$ の下水道管を置き、土被り 60cm および 100cm の下水道管敷設状態を築いた。土被りは一層 20cm 毎に(社)日本道路協会道路示方書に準拠して締め固めた。繰り返し荷重は道路示方書より、輪荷重 $P=250\text{kN}$ ($\approx 25\text{tf}$)の片輪が下水道管上に作用する(衝撃係数 0.3 と仮定)として、 120kN ($\approx 12.5\text{tf}$)を繰り返し載荷荷重とした。繰り返し速度は一級国道の一日平均交通量を参考にして 0.5Hz の正弦波とした。管体応力度は管と管の接合部分の管円周断面を四分割した位置でクロスゲージによりコンクリートのひずみを測定し、応力度に換算した。測定位置を管体接合部としたのは、下水道の構造上、管接合部に変形が生じ易いことからである。

2.4.3 折れ曲げ強度試験

下水道管の曲げ試験は、JSWAS A-6の参考資料に管体の折れ曲げ試験として掲載されているが、軸方向の鉄筋仕様、コンクリート強度を変化させた場合の影響について検討している。しかし、下水道管敷設時、下水道供用開始後などにおいては、多種多様な応力が作用することから、下水



写真-4 外圧圧縮試験状況



写真-5 土被りを考慮した繰り返し曲げ試験状況

道管の曲げ強度を把握しておくことは重要である。

曲げ強度試験は、JSWAS A-6規格の参考資料に記載されている管体の折れ曲げ試験に準拠した。載荷方法は写真-6に示すように、管体スパン中央に一点集中荷重を載荷した。載荷速度は特に規定していないことから、コンクリートの曲げ試験方法で規定している曲げ応力度の増加率が毎秒 $0.06 \pm 0.04\text{N/mm}^2$ となるように調整し、初

期曲げひび割れ荷重(ひび割れ幅 0.05mm)が発生するまで単調に載荷した。

2.4.4 軸方向圧縮強度試験

軸方向圧縮試験の載荷方法は、写真-7に示すようにコンクリートの圧縮強度試験方法に準拠した。JISおよびJSWASでは、鉄筋コンクリート管の品質をコンクリートの圧縮強度で評価しているが、とくに管体自体に関する軸方向圧縮強度の規定はない。しかし、推進施工時における管体の軸方向圧縮強度は重要な工学的特性値となることから、JSWAS A-6 に定められている標準管 1 種 (X51) $\phi 250$ について軸方向圧縮強度試験をおこなった。

2.4.5 シャモットコンクリートの防食効果

下水道コンクリート構造物は、耐久性を向上させ長寿命化を図ることは、新設・既設構造物に関わらず重要な課題である。このような背景から、下水道コンクリート構造物としての腐食防止効果を掘り下げ、さらに実物大シャモット鉄筋コンクリート下水道管の暴露試験を行った。

本実験の一部は、文部科学省学術フロンティア推進事業による私学助成を得ていることから、産学官の連携を重視して暴露試験を行った。試験は O 町の協力を得て、下水道敷設事業の一部に暴露試験区間を設置した。試験区間のマンホールには、シャモット鉄筋コンクリート管製作時に作成した品質管理用供試体を写真-8 に示すように暴露した。下水道施設の腐食劣化要因は多種多様であるが、主たる要因は硫酸による化学的侵食と推察される。硫酸は、密閉されたコンクリート構造物気相部内面の結露水中において、好気性の硫黄酸化細菌による硫化水素ガスから生成される。しかし、下水道施設の腐食はコンクリート表面の pH の低下に伴って進行すると考えられ、コンクリート表面での pH 計測は困難である。したがって、本暴露試験においては、硫化水素濃度と品質管理用供試体の



写真-6 折れ曲げ試験状況



写真-7 軸方向圧縮強度試験状況



写真-8 暴露試験状況

質量によって腐食状態を評価した。

暴露試験状態の環境を表-3に示す。表-3において、一般的に言われている水質がコンクリートの中性化に及ぼす化学成分量は、水質汚濁防止法の基準値に近似している。しかし、硫化水素濃度については、は

表-3 暴露試験状態の環境

区分	水素指数 pH	生物化学的酸素要求量 (1Lにつき5日間にmg)	浮遊物質 (単位1Lにつきmg)	大腸菌群数 (単位 1cm ³ につき 個)
その他の場合	5.8~8.6	120以下	150以下	3,000以下
暴露試験場	6.7~7.3	73~112	96~131	2,037

注) 下水道法施工令第6条

暴露試験場の数値は、年平均を示す。

四季によって変化が認められるものの年平均 0.2~0.8ppm であった。

3. 結果および検討

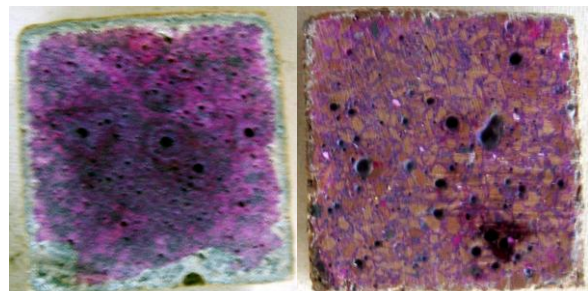
3.1 シヤモット砂および標準砂モルタル供試体による強度性状および腐食性状

材齢 28 日のモルタル供試体の圧縮強度および曲げ強度試験結果を表-4 に示す。表-4 において、シヤモット供試体の圧縮強度は 59.1N/mm² であった。これに対して標準供試体は 52.3N/mm² とシヤモット供試体に対して約 88% であった。また、曲げ強度においてもシヤモット供試体は 9.5N/mm² であったのに対して、標準供試体は 9.3N/mm² と約 98% であった。このように圧縮強度、曲げ強度と共にシヤモット供試体の強度が大きくなったのは、シヤモットの原料がセメントと同様に粘土であることから、セメントの水和反応と同様な反応が、相乗効果としてシヤモットにも作用したものと推察される。特にシヤモット供試体の曲げ強度が、標準供試体に対して約 2% 大きくなったことは、コンクリートの強度性状から考察すると重要な意味を有する。すなわち、コンクリートの曲げ強度は圧縮強度に対し、約 10% 前後と一般的に言われている。したがってシヤモットをコンクリートの細・粗骨材に活用することによって、コンクリート構造部材設計には効果的な好条件となる。

表-4 シヤモットモルタルの曲げ強度試験結果

	圧縮強度 N/mm ²	曲げ強度 N/mm ²
標準砂	52.3	9.3
シヤモット砂	59.1	9.5

注) 材齢は28日



普通モルタル シヤモットモルタル

写真-9 モルタル中性化状態

次に6ヶ月間暴露したシヤモットおよび標準供試体の中性化状況を写真-9 に示す。中性化の進行状況は写真-9 から明らかのように、標準供試体の中性化は、供試体表面から約 5mm の深さまで中性化が進んでいるのに対して、シヤモット供試体は表面から約 1.7mm の深さで、中性化の進行は普通モルタル供試体の約 34% であり、シヤモット供試体に腐食防止効果が認められた。このことからシヤモットモルタルは、下水道施設の腐食防止処理材として期待できる。

3.2 シャモットコンクリートの配合設計

シャモットコンクリートと普通コンクリートとの製管作業内容に要した時間の対比を表-5に示す。表-5において、普通コンクリートの製管に要した時間は25分であったのに対して、シャモットコンクリートの製管時間は35分要した。このように普通コンクリートと比べて、シャモットコンクリートの製管に10分程長く時間を要したのは、シャモットの表面形状に起因していると考えられる。すなわち、シャモットは脆性的破壊性状を有していることから、シャモットの破碎時に破碎面が鋭角になりやすいことから、遠心成型時に生じる骨材間の噛み合わせの不具合調整に時間を要した。また物理性状においては、通常使用している普通コンクリートの細・粗骨材の密度約2.5~2.6より0.1~0.2程小さいことと、吸水率においては細骨材が4.4%、粗骨材が5.2%と普通コンクリートに使用している細・粗骨材に比べて極端に大きいことに因ると考えられる。以上述べたような要因によって、相対遠心加速度(RCF)は、粒子が回転軸を中心に回転することから、骨材の密度差によって密度の小さい骨材は遠心回転内面に浮き上がる。反面密度の大きい骨材は遠心外面に沈むことになる。すなわち通常使用している普通ポルトランドセメントの密度は約3.15g/cm³であるのに対して、本試験で使用したシャモットの密度は2.4g/cm³と小さいことから鉄筋コンクリート管内面にシャモットが浮き出たものと考えられる。したがって、製管仕上げ整正に時間を要したが、シャモットはコンクリート材料として十分に活用できる。

3.3 シャモット鉄筋コンクリート管の強度性状

3.3.1 外圧圧縮強度試験

外圧圧縮強度試験結果を表-6に示す。表-6においてシャモット鉄筋コンクリート

表-5 製管作業に要した時間

作業内容	普通コンクリート	シャモットコンクリート
投入	6分	6分
初速	2分	2分
中速1	2分	2分
中速2	2分	2分
高速	7分	7分
仕上げ	6分	16分
合計時間	25分	35分

表-6 外圧圧縮強度試験結果

コンクリート種別	ひび割れ荷重 規格荷重	破壊荷重 規格荷重
	A-1=11.67kN/m	A-1=25.50kN/m
A-6=32.40kN/m	A-6=49.10kN/m	
普通 コンクリート	A-1=19.07kN/m	A-1=27.86kN/m
	A-6=48.20kN/m	A-6=78.00kN/m
シャモット コンクリート	A-1=23.48kN/m	A-1=38.97kN/m
	A-6=59.30kN/m	A-6=88.90kN/m

管のひび割れ荷重および破壊荷重は、約50~65%、JSWAS A-1およびJSWAS A-6に規定されている外圧圧縮荷重より大きな荷重となった。また、普通コンクリート鉄筋コンクリート管に対してひび割れ荷重および破壊荷重共に約11~28%大きな外圧圧縮荷重が認められた。このようにシャモットコンクリートは、シャモットモルタル供試体の強度性状で述べたようにセメントとシャモットの相乗効果がシャモットコンクリートにおいても認められた。

3.3.2 土被りを考慮した繰り返し外圧圧縮強度試験

土被りを考慮した繰り返し外圧圧縮試験によるコンクリート応力試験結果を表-7に示す。表-7において、輪荷重による外圧圧縮の管体への到達応力は土被り厚に左右

される。このことは、半無限弾性地盤に集中荷重Pが作用すると伝播応力は、ブーシネスク理論により、下水道間頂部（ $\theta = 0^\circ$ ）での最大荷重強度 Pl_{max} は式（1）で与えられる。

$$Pl_{max} = \{3P(1+i) / 2\pi H^2\} \times \cos 5\theta$$

$$= 3P(1+i) / 2\pi H^2 \dots (1)$$

ここに、i：衝撃係数（0.3と仮定）

H：土被り厚さ

一般土木コンクリート構造物の繰り返し疲労限界は 200×10^6 回とされている。そこで土被り 60cm の場合の繰り返し回数 200×10^6 回時における普通コンクリートおよびシャモットコンクリートの圧縮応力をブーシネスクの一様分布荷重で評価すると、管体が受けたリング状応力は、極方向で普通コンクリートが $11.7 \sim 12.3 \text{ N/mm}^2$ 、これに対してシャモットコンクリートは $12.1 \sim 12.5 \text{ N/mm}^2$ であって、普通コンクリートとシャモットコンクリート間の差異は極小であった。圧縮応力に対して、赤道方向では普通コンクリートが $0.56 \sim 0.64 \text{ N/mm}^2$ であったのに対して、シャモットコンクリートは $0.61 \sim 0.67 \text{ N/mm}^2$ の引っ張り応力が作用した。引張応力および圧縮応力共にシャモットコンクリートが大きくなる傾向を示したのは、弾性係数に起因していると推察される。このことから、国土交通省が提示している最小土被り 60cm に対して、シャモット鉄筋コンクリート管は JASWAS A-6 規格に適合すると判断できる。

3.3.3 折れ曲げ強度試験

曲げ試験結果を表-8 に示す。表-8 においてシャモットコンクリート下水道管および普通コンクリート下水道管の曲げ強度は、それぞれ 72.3 kN および 72.3 kN であって、曲げ強度は同等であった。コンクリートの強度性状は、一般的に圧縮強度に対して約 $10 \sim 7\%$ 程度と言われている。これは、コンクリートが破壊近傍の応力状

表-7 土被りを考慮した繰り返し外圧圧縮試験結果

土被り (t:cm)	引張応力 (N/mm ²)		圧縮応力 (N/mm ²)	
	普通コンクリート	シャモットコンクリート	普通コンクリート	シャモットコンクリート
60	0.56	0.61	11.7	12.1
	0.57	0.64	11.9	12.3
	0.61	0.65	11.9	12.4
	0.62	0.66	12.1	12.6
	0.64	0.67	12.3	12.6
100	0.54	0.57	10.5	11.7
	0.56	0.58	10.8	11.7
	0.59	0.58	11	11.9
	0.6	0.59	11.1	12.1
	0.6	0.61	11.2	12.3

注)表中の応力は、繰り返し回数 200×10^6 回時の応力である。

表-8 折れ曲げ試験結果

普通コンクリート		シャモットコンクリート	
実測値	平均値	実測値	平均値
72.4	72.3	73.1	72.3
72.2		72.2	
72.2		71.6	

注)表中の数値は、ひび割れ発生時の強度。単位はKNである。

表-9 軸方向圧縮強度試験結果

供試体N.o	軸方向圧縮強度N/mm ²	
1	58.7	59.7
2	59.2	
3	59.4	
4	59.5	
5	60.1	
6	61.4	

態が塑性的性を示すことと、その性状が極小間で示され、曲げ強度差異が認められなかったものと推察される。

3.3.4 軸方向圧縮強度試験

軸方向圧縮強度試験結果を表-9 に示す。表-9 において軸方向圧縮強度の平均値は 59.4 N/mm^2 であった。これは JASWAS A-6 規格で規定している 50 N/mm^2 を約 19% 上回る結果となったことから、シャモットコンクリートは下水道推進管として十分に対応可能である。

