

シャモットを活用した下水道管の強度性状

河合 紘 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²⁾に準拠し、粒度 15~0mm 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. 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 に破碎した。その粒度曲線を図-1 に示す。シャモッ



写真-1 分別収集されたシャモット



写真-2 粉碎されたシャモット

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。

2-1 シヤモット砂および標準砂モルタルの供試体による強度性状および腐食性状

シヤ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 R5201 のセメント強さ試験³⁾に準拠し、シヤモット砂（以前シヤモットと略記）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。

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-2 に示す。表-2 において、シヤモット供試体の圧縮強度は 59.1N/mm^2 であった。これに対して標準供試体は 52.3N/mm^2 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/mm^2 であったのに対して、標準供試体は 9.3N/mm^2 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。

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-3 に示す。中性化の進行状況は写真-3 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

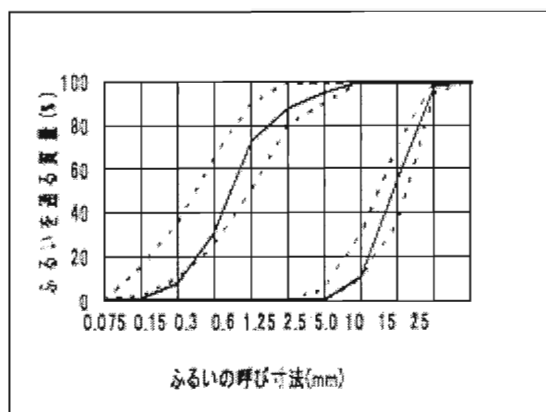


図-1 シヤモットの粒度曲線

表-1 シヤモットの物性

	細骨材	粗骨材
密度(g/cm^3)	2.4	2.4
吸水率(%)	4.4	5.2
粗粒率	4.17	6.22

表-2 シヤモットモルタルの曲げ強度試験結果

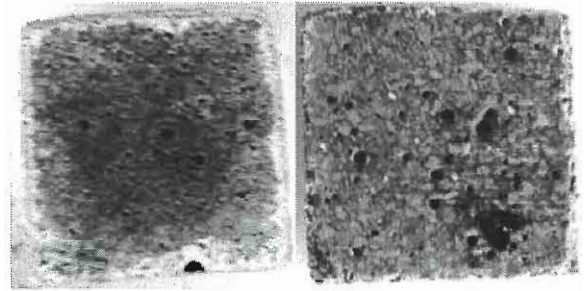
	圧縮強度 N/mm^2	曲げ強度 N/mm^2
標準砂	52.3	9.3
シヤモット砂	59.1	9.5

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. シヤモットコンクリートの配合設計

シヤモットの物理性状、シヤ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、シヤ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、シヤモットコンクリートの試し練りを繰り返し行い、表-3 に示

すシャモットコンクリートの配合を決定した。表-3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-4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。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-4に示す。表-4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、シャモットの破砕時に破砕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。



普通モルタル シャモットモルタル

写真-3 モルタル中性化状態

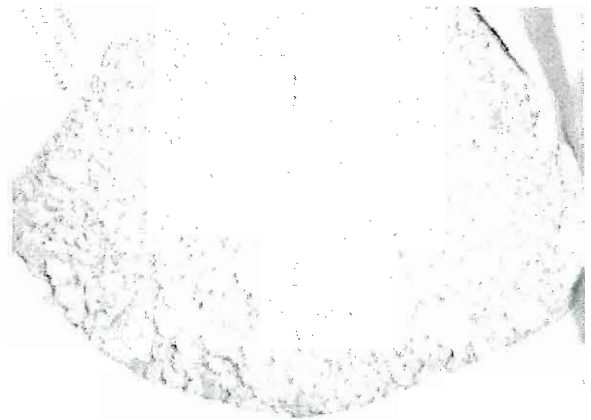


写真-4 シャモットコンクリートの練り上がり状態

表-3 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

表-4 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

4. シャモット鉄筋コンクリート管の強度性状

シャモットコンクリートによる鉄筋コンクリート製管が可能であるとの地検から、(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正常についても述べる。

4-1 外圧圧縮強度試験

外圧圧縮強度試験は、写真-5 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 $0.06 \pm 0.04 \text{N/mm}^2$ となるように調節し、最大荷重に至るまでその増加率を保持して載荷した。試験結果を表-5 に示す。表-5 においてシャモット鉄筋コンクリート管のひび割れ荷重および破壊荷重は、約 50~60%、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。

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 8) 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

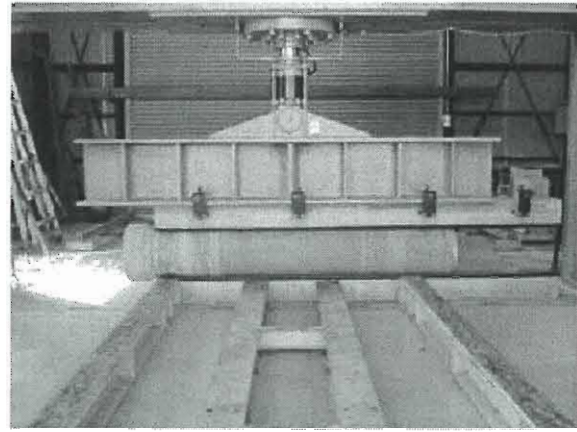


写真-5 外圧圧縮試験状況

表-5 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
普通 コンクリート	A-1=11.67kN/m	A-1=25.50kN/m
	A-6=32.40kN/m	A-6=49.10kN/m
シャモット 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

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-6 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（≒12.5tf）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。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-6 に示す。表-6 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、ブーゼスク理論により、下水道間頂部（ $\theta = 0^\circ$ ）での最大荷重強度 P_{lmax} は式（1）で与えられる。 $P_{lmax} = \{3P(1+i) / 2\pi H^2\} \times \cos^5 \theta = 3P(1+i) / 2\pi H^2 \cdot \cdot (1)$

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 200×106 回とされている。そこで土被り 60cm の場合の繰り返し回数 200×106 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ゼ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

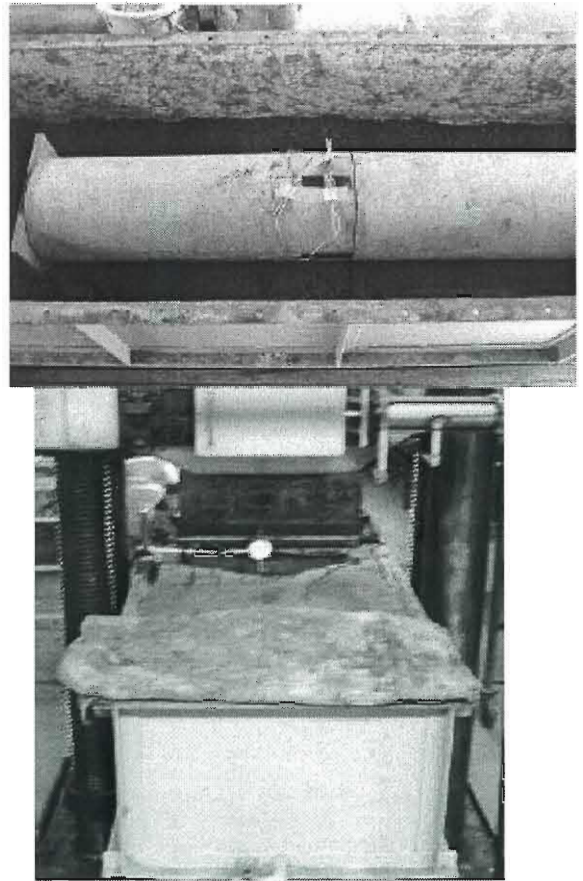


写真-6 土被りを考慮した繰り返し曲げ試験状況

表-6 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 200×106 回時の応力;

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。

5. 折れ曲げ強度試験

下水道管の曲げ試験、JASWAS A-6 の参考資料に管体の折れの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

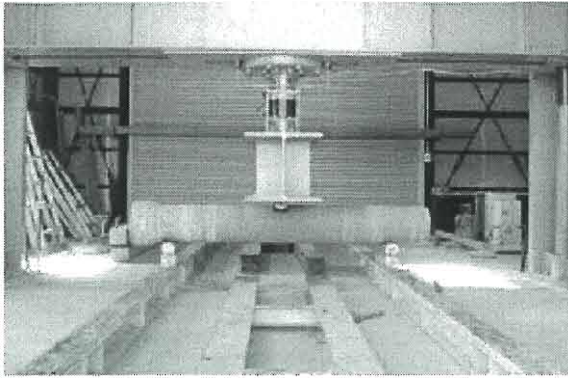


写真-7 折れ曲げ試験状況

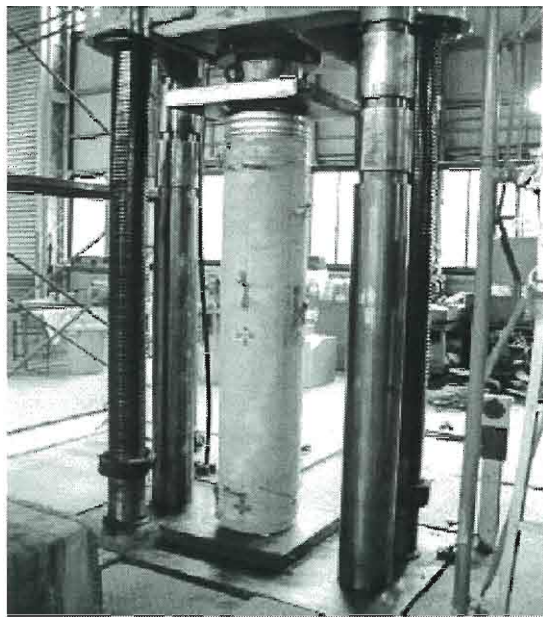


写真-8 軸方向圧縮強度試験状況

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-7 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 0.05 mm ）が発生するまで単調に載荷した。

表-7 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-8 軸方向圧縮強度試験結果

供試体 No	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	

曲げ試験結果を表-7 に示す。表-7 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 k 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態が塑性的を示すことと、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。

6. 軸方向圧縮強度試験

軸方向圧縮試験の載荷方法は、写真-8 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 JASWAS 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

験状態の環境を表-9に示す。表-9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、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。暴露試験期間1年6ヶ月の中性化深さの影響は、写真-10に示すように供試体の一部分が水面下と水面上にある状態で差異が認められた。中性化の進行は、供試体の一部分が水面上にある部分から進行している。すなわち普通コンクリートの場合、コンクリート上部から約3~10mmであるのに対してシャモットコンクリートは供試体上部から2~3mmであった。中性化および腐食が供試体上部から進行していることから、前述のように結露水によって発生する硫化水素に起因していると推察される。以上のことから、シャモットコンクリートの中性化、腐食防止効果があったと考えられる。

8. まとめ

シャモットは、本試験の範囲内で、以下に述べる下水道施設、環境負荷および(社)日本下水道協会で規定している鉄筋コンクリート下水道管に使用しても問題ないと言える。

- 1) シャモットモルタルは、下水道施設の腐食防止処理材として期待できる。
- 2) 外圧圧縮強度、土被りを考慮した繰返し外圧圧縮強度、折れ曲げ強度および軸方向圧縮強度は何れも(社)日本下水道協会の規格を満足するものであった。
- 3) シャモット鉄筋コンクリート管は、細・粗骨材にリサイクル材であるシャモットを活用することによって、環境負荷低減が期待できる。
- 4) シャモット鉄筋コンクリート管は、シャモットが有する物性から防食効果も期待される。

- 5) シャモット廃材は、コンクリートの細・粗骨材に利用することによって、ゼロエミッション化への一助となることが認められた。