

研究論文

瓦シャモットによる地盤液状化の抑制

村瀬晴紀^{*1}、深澤正芳^{*1}、星 幸二^{*1}

Liquefaction Control with Roofing Tile Chamotte

Haruki MURASE^{*1}, Masayoshi FUKAZAWA^{*1}
and Koji HOSHI^{*1}Tokoname Ceramic Research Center^{*1}

瓦の製造段階で発生する規格外瓦の破砕物である、瓦シャモットを用いた地盤液状化対策のモデル試験を行った。異なる粒度に調製したシャモットを用い、簡易振動試験装置による液状化試験を行った。試験を行ったすべての粒度のシャモットで、土木用の標準砂である豊浦砂と比較し液状化が抑制された。この中で最もコスト的に有利な粒度 0~5mm のシャモットについて、地盤振動装置を用いて液状化試験を行った¹⁾。試験は住宅への施工と埋設管への施工を想定した 2 つのモデルで行った。シャモットが粒子の隙間を保持し過剰間隙水圧を消散させることで、住宅モデルでは水分の噴出が抑制され、埋設管モデルでは管の浮上が抑制された。いずれも豊浦砂と比較して液状化の被害が軽減されるものと推定される。

1. はじめに

平成 23 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震では震源地付近の津波による被害だけでなく、震源地から遠く離れた千葉県などでも液状化の被害が多数発生した。愛知県を含む東海地方でも連動型の大規模地震の発生が懸念されており、津波への対策だけでなく、地盤の液状化への対策も急務となっている。

一方、愛知県は日本一の瓦の産地であり「三州瓦」は全国シェア約 70%となっている。瓦は配合土を焼成して製造するが、乾燥、焼成工程で大きく収縮し、寸法精度の悪化、形状の歪み、亀裂の発生などにより規格から外れた規格外瓦が発生する。この規格外瓦はリサイクルする体制の構築が進められており、約 84%が瓦の配合土へと戻されているが、まだ全量リサイクルには至っていない。

液状化は地震の揺れによって、地盤を構成する砂、粘土粒子が移動することで発生する。粒子の移動によって粒子間の隙間が減少し、粒子間に保たれていた水分の水圧が上昇することで地表に泥が吹き出す。シャモットは瓦を破砕して作られるため、多孔質かつ凹凸のあるいびつな形状をしている。この形状のため、地盤が振動しても動きに抵抗があり移動しにくいこと、粒子同士がつくる空間に水分を保持できることが予測される。そこで今回の共同研究では、シャモットの特異な粒子形状とリサイクルに着目し、シャモットを地盤の液状化対策に活用するモデル試験を行った。

2. 実験方法

2.1 簡易振動装置による最適粒度の決定

液状化対策に最も効果的な粒度の把握のため、図 1 に示す簡易振動装置を用いて各粒度のシャモットで作製した地盤（シャモット地盤）の液状化試験を行った。また豊浦標準砂でも同様の試験を行い、シャモットの場合と比較した。簡易振動装置は左右に一次的に振動し、震度は 6 相当の加速度になるように調整した。地盤は、水を張った振動容器内にシャモットを静かに落下させ（水中落下法）、粒子間に含まれる水分が飽和状態になるように作製した。試験に用いたシャモットの粒度は 0~2mm、0~5mm、2~5mm、2~10mm、5~13mm である。地盤内に比重 1.2、直径 1/10 縮尺のマンホール模型を埋め込み、浮き上がり量で評価を行った。



図 1 簡易振動装置

^{*1} 常滑窯業技術センター 三河窯業試験場

2.2 地盤振動装置による液状化試験（住宅モデル）

2.1 の試験より、最も液状化対策に適したシャモットを用いて、**図2**に示す地盤振動装置による住宅への施工を模した液状化試験を行った。既存住宅の周囲にシャモットの地下壁を設置するように施工した場合を想定しており、試験規模は実物の 1/30 である。試験に用いた地盤の見取り図を**図3**に示す。未対策の砂地盤部分と、小規模住宅への施工を模した部分、小規模住宅街への施工を模した部分を作製した。地盤は水中落下法で作製し、水分飽和状態とした。震度は 6 相当である。結果の判定は、目視による液状化の有無と水圧計による過剰間隙水圧の測定により行った。



図2 地盤振動装置

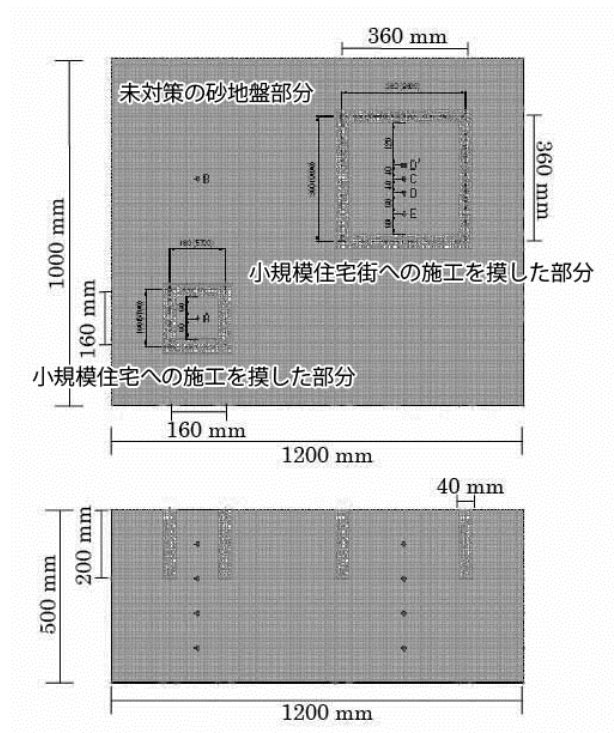


図3 住宅モデル見取り図

2.3 地盤振動装置による液状化試験（埋設管モデル）

マンホールなどの埋設管への施工を模した液状化試験を行った。マンホールの周囲に埋め戻し材としてシャモットを施工した場合を想定しており、試験規模は 1/10 である。

振動装置は 2.2 と同様のものを用いた。試験に用いた地盤モデルの見取り図を**図4**に示す。砂地盤に比重 1.2 に調整した直径 100mm 長さ 300mm のマンホール模型を設置した未対策部分と、その周囲をシャモットで囲った液状化対策部分を作製した。地盤は水中落下法で作製し、水分飽和状態とした。震度は 6 相当である。結果の判定は、目視による液状化の有無とマンホールの浮き上がりにより行った。

2.4 シャモットの粒度と内部摩擦

シャモットの地盤性質、強度の評価のため、粒度分布測定と内部摩擦の測定を行った。

粒度分布測定は 2.2、2.3 で使用した粒度のシャモットに対して行い、湿式機械ふるい分けとレーザー回折散乱法による分析を行った。ふるい分けは $45\mu\text{m}$ 、 $90\mu\text{m}$ 、 $150\mu\text{m}$ 、 $300\mu\text{m}$ 、 $600\mu\text{m}$ 、 $1180\mu\text{m}$ 、 $2000\mu\text{m}$ 、 $4000\mu\text{m}$ 、 $9500\mu\text{m}$ のふるいを用いた。レーザー回折散乱法による粒度分析は HORIBA LA500 を用いて、 $45\mu\text{m}$ ふるい通過分に対して $0.1\mu\text{m}$ から $200\mu\text{m}$ の範囲で行った。

内部抵抗の測定は、安息角の測定と一面せん断試験によって行った。安息角の測定は、シャモット(メジアン径 0.847mm)、土木用の標準砂である豊浦砂(メジアン径 0.173mm)、珪砂 7 号(メジアン径 0.153mm)とで比較し、それぞれを一定の高さから自然落下させ、測定を行った。またシャモットの一面せん断試験による内部摩擦角の測定を行い、一般的な砂の値と比較した。

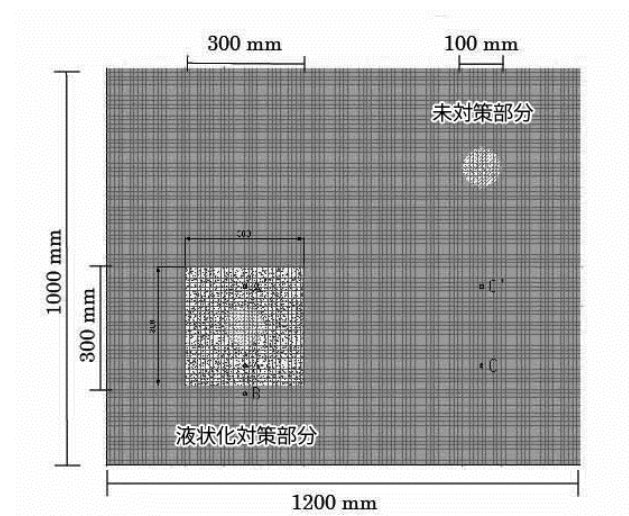


図4 埋設管モデル見取り図

3. 実験結果及び考察

3.1 簡易振動装置による最適粒度の決定

表 1 に、簡易振動装置を用いて行った液状化試験の結果を示す。震度 6 相当の加速度で加振した結果、豊浦砂では液状化が見られ、比重 1.2 のマンホール模型の浮き上がりが確認された。また、加振中に砂が波打つように移動した。シャモットでは、すべての粒度においてマンホール模型の浮き上がりが見られず、シャモットが波打つことも無かった。以上の結果から、簡易試験においては粒度にかかわらずシャモットの液状化対策への有効性が示唆された。よって以降の試験ではコスト的に最も優れている 0~5mm のシャモットについて試験を行うこととした。

表 1 粒度別の液状化簡易試験結果

シャモット粒度 mm	比重	結果
0~2	1.71	浮上無
0~5	1.69	浮上無
2~5	1.58	浮上無
2~10	1.55	浮上無
5~13	1.57	浮上無
豊浦砂	1.80	浮上、倒れ

3.2 地盤振動装置による液状化試験（住宅モデル）

図 5 に振動試験中の地盤を示す。A 地点は未対策部分、B 地点は小規模住宅への対策部分、C 地点は小規模住宅街への対策部分である。A 地点では水分が吹き出し、液状化による被害が見られた。また、振動によって地盤が波打つ様子も確認された。一方シャモットを施工した B、C 地点では液状化による水分の噴出が抑えられていた。

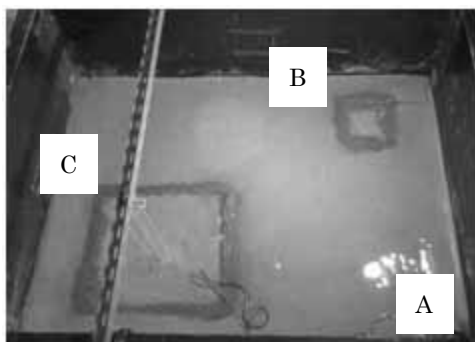


図 5 振動試験後の地盤（住宅モデル）

図 6 に住宅モデルの再現解析²⁾によって得られた過剰間隙水圧の時間変化を示す。地盤を横から見たときの水圧の変化で、濃い色ほど水圧が高い。加振直後にはシャモットで囲まれた部分でも水圧の上昇が見られたが、その後はシャモット周囲から水圧の低下が見られた。シャ

モットが排水壁として機能しており、シャモットの囲い内は急速に液状化から回復している。シャモットで囲まれた B 地点の水圧の消散は未対策部分である A 地点と比較して 3 秒以上も早く、特にシャモット壁に近い部分では加振中から水圧の減少が見られた。このことは実験結果とも一致しており、シャモットでの施工は液状化を完全に防ぐことは困難なものの、液状化の被害を抑える減災効果は期待できると考えられる。

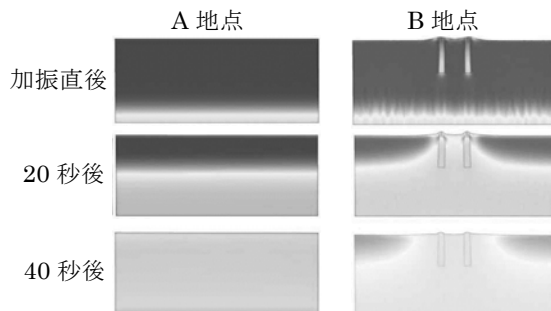


図 6 地盤の過剰間隙水圧の時間変化（住宅モデル）

3.3 地盤振動装置による液状化試験（埋設管モデル）

図 7 に振動試験後の地盤の様子を示す。D 地点は豊浦砂のみに支えられた未対策のマンホール部分であり、E 地点はシャモットで周囲を覆った対策マンホール部分である。未対策のマンホールでは液状化による大幅な浮上が見られた。浮上量はマンホール全体の約 1/3 である 96mm であった。対策されたマンホールでの浮上量は 37mm であり、未対策のマンホールの 40% 程度に抑制されていた。液状化を完全に抑制することは困難であったが液状化対策に十分な減災効果が見られ、シャモットを施工したマンホールでは浮上、勾配の変化などによる被害を抑制し、復旧までの期間、費用を抑えることが期待できる。また今回の試験では実際の埋設管設置工程に合わせて行ったため、マンホールの下面はシャモットで覆われていない。対策マンホールの浮上はこの部分が液状化したことによって発生したと考えられる。よって、下面までシャモットで覆うことができれば、より被害を抑制することができると推定される。

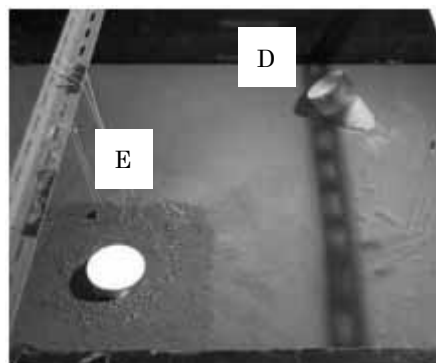


図 7 振動試験後の地盤（埋設管モデル）

3.4 シャモットの粒度と内部摩擦

図8に0~5mmのシャモットの粒度分布を示す。右がふるい分け試験における粒度分布、左が $45\mu\text{m}$ ふるい通過分に対して行ったレーザー回折散乱法による粒度分布である。 $4000\mu\text{m}$ 以上から $1\mu\text{m}$ 以下まで広い範囲に粒径が分布していることから、締固め特性の良い土と言え、地盤とした際の実用上十分な強度が期待できる。

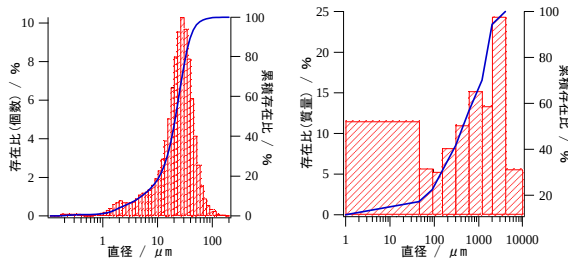


図8 0~5mm シャモット粒度分布

(左はレーザー回折による微粒子の粒度分布。右はふるい分けによる粗大粒子の粒度分布。)

図9に安息角の比較結果を示す。安息角は自然落下させたときの最大角度であり、圧力がかかっていないときの摩擦に相当するが、シャモットの安息角は 41° と最も大きく、代表的な砂である豊浦砂や珪砂7号と比較して粉体流動性が低い。

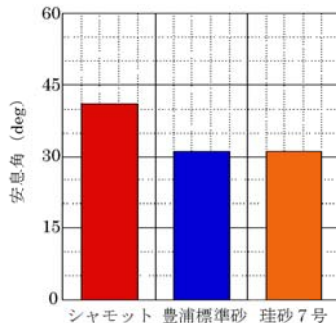


図9 安息角の比較

図10に一面せん断試験による内部摩擦角の結果を示す。一面せん断試験は一方から圧力がかかった際の内部摩擦に相当し、シャモットの内部摩擦角は 42° と一般的な砂の 30° ³⁾と比較して高い結果となっている。

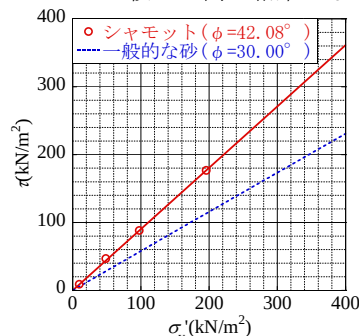


図10 一面せん断試験による内部摩擦角

安息角及び内部摩擦角の結果から、シャモット地盤は粒子間の摩擦抵抗が大きく、自立性の高い地盤といえる。これは地震の際でも粒子のずれが小さく、粒子間の隙間が減少することが少ないことを示す。地震により周囲の地盤が液状化しても、シャモットが保持した隙間に周囲の水圧を引き受けることで、液状化対策に効果を示したと考えられる。

4. 結び

本研究の結果をまとめると、以下のとおりである。

- (1) 住宅への施工モデル試験及び過剰間隙水圧の解析結果より、シャモット壁の内部は水圧の消散が3秒以上も早く開始され、特にシャモット壁付近では加振中から水圧の減少が見られた。
- (2) マンホールへの施工モデル試験では、未対策マンホールと比較して被害を約40%に抑制し、明確な液状化対策効果が見られた。
- (3) シャモットが液状化対策に効果を示す主要因は、シャモット粒子の形状と表面の粗さにより振動によって起こる動きに抵抗があり、粒子間の隙間を振動後も保持すること、保持した隙間に周囲の水圧を引き受けることで、周囲の液状化を早期回復する効果があることによる。

これらの結果から、シャモット透水壁の設置、管巻材としての使用は液状化の減災に十分に効果があることが分かった。安価で効果的な液状化減災の一手段として効果を期待できるものであった。

謝辞

本研究を実施するにあたり、ご指導・ご協力をいただいた愛知県陶器瓦工業組合技術施工委員会神谷彦二委員長、名古屋工業大学張鋒教授、前田健一教授、森河由紀弘院生（現助教）ならびに関係各位に感謝いたします。

付記

本研究は平成24年度に実施した愛知県陶器瓦工業組合、名古屋工業大学との共同研究の成果の一部である。

なお、愛知県陶器瓦工業組合の研究開発については、「産業空洞化対策減税基金」に基づく「新あいち創造研究開発補助金」を活用したものである。

文献

- 1) 森河他：第48回地盤工学研究発表会，889(2013)
- 2) 森河他：地盤工学ジャーナル，7(2)，389(2012)
- 3) 土木構造物標準設計 第2巻解説書，P6(2000)，全日本建設技術協会