

土のう型リサイクル材料を用いた 下水道マンホールの液状化時浮上軽減対策 に関する研究

吉田 雅穂¹・塔尾 勝²・宮島 昌克³・北浦 勝⁴

¹福井工業高等専門学校准教授 環境都市工学科 (〒916-8507 福井県鯖江市下司町)

E-mail: masaho@fukui-nct.ac.jp

²福井市役所 (〒福井県福井市大手3丁目10-1)

³金沢大学教授 大学院自然科学研究科 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail: miyajima@t.kanazawa-u.ac.jp

⁴金沢大学教授 大学院自然科学研究科 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail: kitaura@t.kanazawa-u.ac.jp

平成16年新潟県中越地震では埋戻し土の液状化による下水道マンホールの突出被害が1,400箇所以上も発生した。過剰間隙水圧の早期消散を目的とした液状化対策工法として、透水性の高い砕石等を地盤内に設置する工法が提案されているが、本研究では、廃タイヤを破碎したタイヤチップや廃コンクリートより抽出した再生砕石を砕石の代替材料として活用し、また、これらリサイクル材料を土のう袋に詰め込んで作製した土のう型ドレーン材をマンホールの周囲に設置し、液状化時の浮上を軽減する工法を提案した。模型振動実験を行った結果、本工法によるマンホール浮上軽減効果を確認するとともに、高い透水性能を有するタイヤチップの有効性を明らかにした。

Key Words : liquefaction, shaking table test, manhole, countermeasure, recycling

1. はじめに

平成16年新潟県中越地震による被害のうち、下水道施設の被害額は新潟県で総額206億円(管渠308.6km, マンホール3,473箇所, 処理場12箇所)と甚大なものであった。中でも、管渠の破損やマンホールの突出などの管路施設被害が顕著であり、特に埋戻し土の液状化によるマンホールの突出被害は1,400箇所以上にも上り、車道や歩道では埋戻し部の路面陥没が多数発生した。その結果、各家庭のトイレが使用できなくなる住民生活への影響、未処理水の漏洩による公衆衛生や水質環境への影響、道路の車輛通行が阻害される社会活動への影響などの二次災害が発生した。

ところで、全国の下水道管渠の総延長は約38万kmであり、マンホールの設置数は約1,000万基以上といわれている。すなわち、マンホールは下水道管渠の約30mに1基の割合で設置されていることになる。また、現在の下水道処理人口普及率は全国平均で69.3%(2006年3月31日現在)であり、今後も新規および更新等の整備が継続し

て行われるため、我が国の下水道ストックは今後もさらに増加していくことが予想されている。

近年の都市域における地震災害では、下水道施設の被災が顕著となっており、これにより、上水道が早期に復旧しても下水処理ができず、上水道の利用に障害が生じる問題も発生している。したがって、人々の生活に欠かすことのできない重要なライフライン構造物のひとつとして、下水道施設の耐震性を向上させることは大変重要なことといえる。

このような観点から本研究では、下水道施設のうち特にマンホールの耐震性向上を目指し、液状化に起因するマンホールの浮上を軽減するための対策工法を開発することを目的として模型振動実験による検討を行った。図-1に本研究で提案するマンホールの浮上軽減対策の概要を示す。本工法は、マンホールの周囲に透水性の高いリサイクル材料を土のう袋に詰め込んだ「土のう型リサイクル材料」を設置することにより、埋戻し部の液状化強度を高めるとともに周辺地盤で発生する液状化も防止することを目的としている。

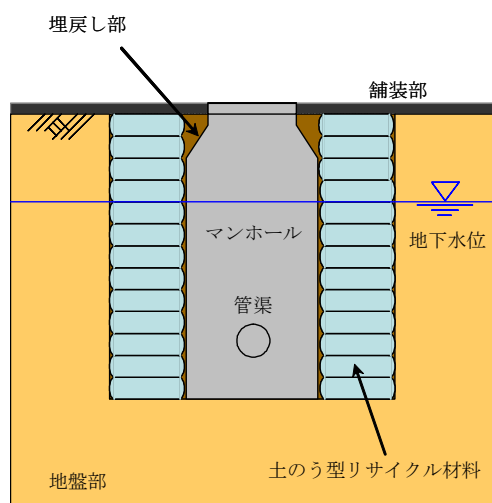


図-1 対策工法の概要

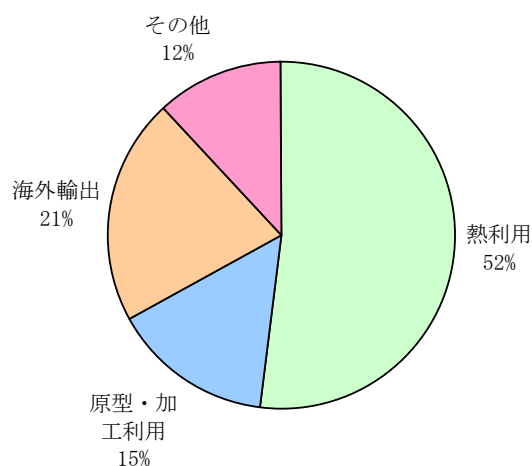


図-2 廃タイヤのリサイクル状況②

2. 土のう型リサイクル材料

新潟県中越地震における下水道管路の被害を受けて、長岡市によって作成された「管路施設震災復旧マニュアル¹⁾」によれば、本復旧におけるマンホール周辺を含めた管路施設の埋戻し方法として、埋戻し部の締固め、碎石による埋戻し、埋戻し土の固化の3つの地盤改良工法が提案されている。本研究は、このうち碎石による埋戻しに着目するものであり、一般に用いられる自然碎石の代わりに、リサイクル材料を活用することを提案している。すなわち、廃タイヤを破砕したタイヤチップや、廃コンクリートより作製したクラッシャーランから抽出した再生碎石などの粒状材料を、碎石の代替材料として活用するものである。

平成17年度の我が国における廃タイヤのリサイクル状況²⁾は図-2のとおりであり、リサイクル率は88%と高いが、年間発生量が1億30万9千本(102万2千トン)と非常に多いため、廃タイヤの不法集積・不法投棄等の問題が発生しており、その処理方法に関する検討が急務となっている。また、図-3に示すように平成17年度の我が国の建設廃棄物排出量³⁾のうち、コンクリート系廃材の占める割合は75%と最も多いが、そのリサイクル状況は98%と非常に高い。したがって、現在では用途の拡大などリサイクルの質の向上に関する取り組みが望まれている。

ところで、著者等は廃タイヤを破砕して作製したタイヤチップを、液状化対策の一つである間隙水圧消散工法のドレーン材として活用することを目的として模型振動実験による検討を行ってきた。その結果、タイヤチップの高い透水性能による過剰間隙水圧の早期消散効果を確認する一方で、以下に示す問題点を明らかにしている⁴⁾。

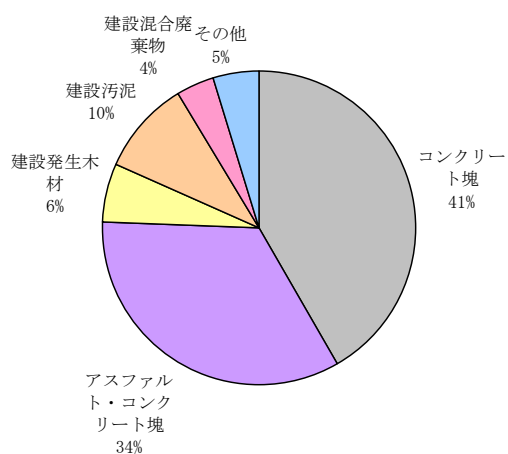


図-3 建設廃棄物の排出量③

すなわち、「タイヤチップは一般的なドレーン材として利用されている碎石と比較して、粒径が大きい、密度が小さい、変形性能に優れている等の物理的特性を有する。そのため、地盤内にドレーン材として設置した場合、地震時に粒子結合が不安定となり、ドレーン内において過剰間隙水圧が発生する。その結果、飽和砂地盤で発生した過剰間隙水圧とドレーン部との動水勾配が相対的に小さくなり、碎石に匹敵する水圧消散効果が得られない。さらに、間隙が大きいため地震後の目詰まりが懸念される。」という点である。

このような問題に対処するため、本研究ではリサイクル材料を土のうで包み、「土のう型ドレーン材」として利用することを提案している。これは、バラバラの粒子を土のうで包むことにより、外力が作用した場合には中込材の粒子間力が増加し、それにより耐荷力や減震効果が増大するという特徴⁵⁾を利用するものである。また、粒状材料を土のうに包むことにより、目詰まり防止効果を付加することを期待している。

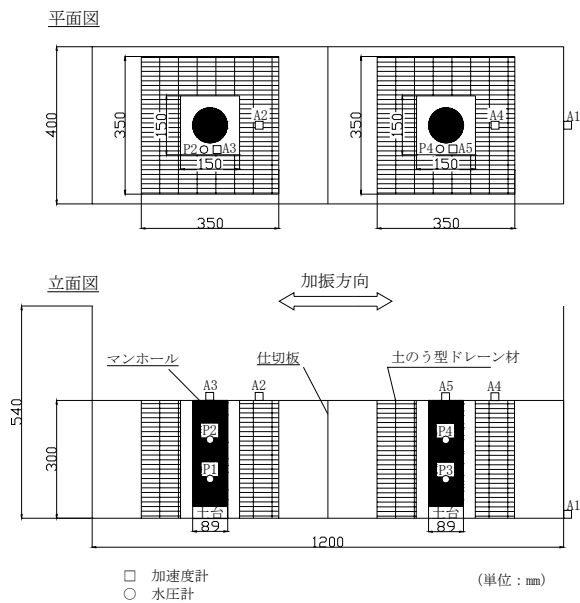


図-4 模型地盤の概要

3. 実験概要

図-4に模型地盤の概要を示す。振動台上に設置した幅1,200mm、奥行き400mmの亚克力製土槽の中に、層厚300mmの模型地盤を作製した。地盤中央には鋼製の仕切板を設置し、一方にタイヤチップ、他方に再生碎石の土のう型ドレーン材を設置した。地盤は珪砂7号を用いて水中落下法により作製した緩詰め飽和砂層であり、地下水位は地表面と一致している。タイヤチップは、廃タイヤをせん断式破砕機に通して作製した約5cm角のタイヤ片をさらに切断し、粒径を10～16mmに調整して作製した(写真-1参照)。また、再生碎石は、廃コンクリートから抽出した碎石を2.5～5mmに粒度調整したものである(写真-2参照)。土のう型ドレーン材は、市販のポリエチレン製の土のう袋を所定の寸法(長さ250mm×幅100mm×高さ50mm)に加工した袋の中に上記リサイクル材料を詰め込んで作製し、写真-3に示すようにマンホールの周囲を囲むように設置した。ここで、土のう1個当たりの重量はタイヤチップの場合1.0kgf、再生碎石の場合2.2kgfとなっている。ドレーン材の設置方法は、図-5に示すように土のうの積み重ね方を変化させ、「5段」、「上3段」、「下3段」、そして、「下3段改良」の計4パターンについて検討を行った。

模型マンホールは、直径89mm、高さ270mmの塩化ビニル管を使用し、液状化によってマンホールが確実に浮上するよう比重を1.0に設定した。なお、マンホール側面地盤における液状化の影響を検討するため、マンホール底部に高さ30mmのモルタル製の土台を設置し、マンホー

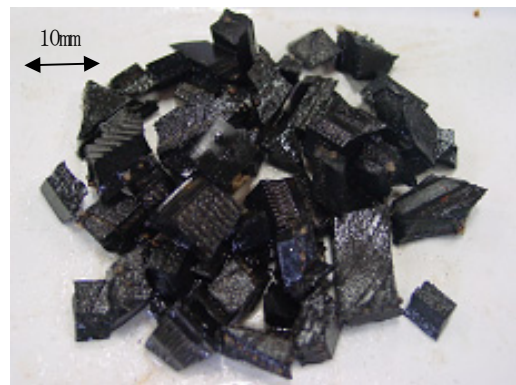


写真-1 タイヤチップ

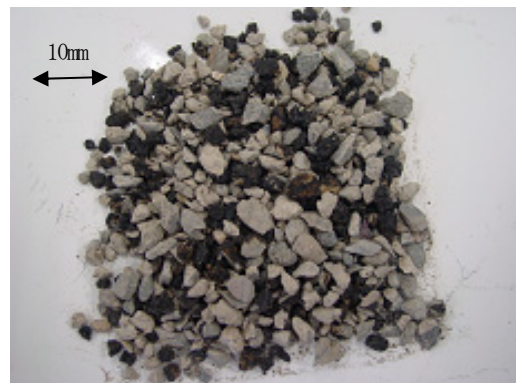


写真-2 再生碎石



写真-3 土のう型ドレーン材 (5段)

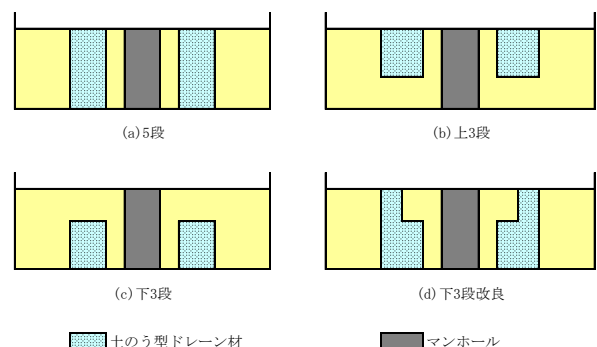


図-5 土のう型ドレーン材の設置パターン

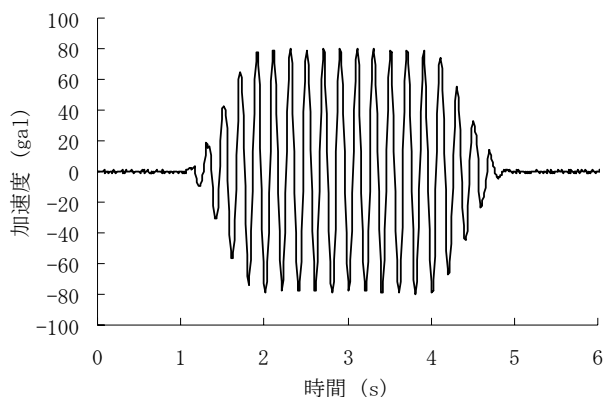


図-6 入力加速度の時刻歴波形

表-1 実験材料の物理定数

材料	珪砂7号	リサイクル材料		砕石7号
		タイヤチップ	再生砕石	
密度 ρ (g/cm ³)	2.63	1.26	2.56	2.56
平均粒径 D_{50} (mm)	0.17	8.00	3.25	3.55
均等係数 U_c	1.64	1.66	3.50	2.72
曲率係数 U_c'	0.99	0.91	2.16	1.52
透水係数 k (cm/s)	4.79×10^{-3}	1.84×10^{-1}	1.40×10^{-1}	1.57×10^{-1}
土のう袋で包んだ場合の透水係数 k (cm/s)		1.68×10^{-1}	1.17×10^{-1}	1.33×10^{-1}

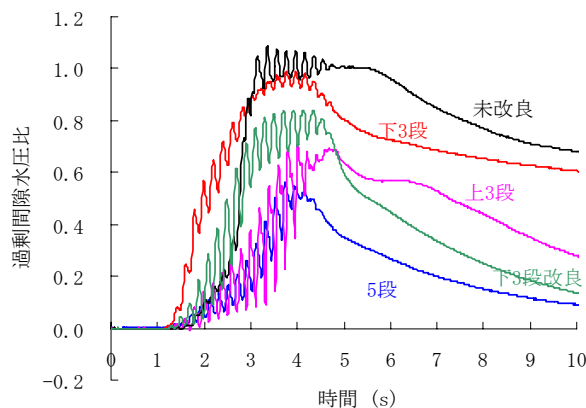
ル下部には砂が存在しない状態とした。

入力波は5Hzの正弦波を20波とし、80gal、100gal、120gal、140gal、160galと最大加速度を順に変えた実験を行い、同一地盤に対し計5回の加振を与えた。図-6に加速度80galの時の入力波の時刻歴波形を示す。計測項目は、入力加速度、地盤の過剰間隙水圧、地盤および土のうの応答加速度と残留変位、そして、模型マンホールの浮上量である。

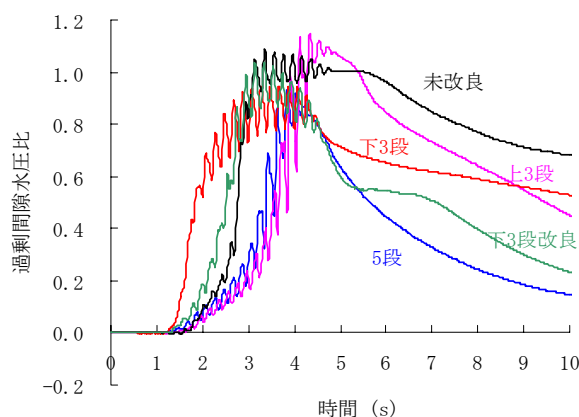
表-1に実験に用いた各材料の物理定数を示す。同表より、タイヤチップの密度は再生砕石の約半分となっていることから、軽量材料であることがわかる。また、同表に示す砕石7号の数値より、再生砕石がほぼ同等の材料であることがわかる。さらに、リサイクル材料を土のう袋に包んだ状態で透水試験を行った結果、包んでいない状態と比べて透水係数の低下は最大で約16%の減少と比較的少ないことが明らかとなった。

4. 実験結果および考察

図-7は土のう型ドレーン材で囲まれた地盤の深さ20cmの位置 (P1, P3) における過剰間隙水圧比の時刻歴波形を示したものであり、加振2回目 (100gal) の結果の一例である。同図(a)がタイヤチップ、同図(b)が再生砕石の結果である。未改良の場合では過剰間隙水圧の消散が終了するまで約40秒を要したが、同図より、ドレーン材を設置した場合には、いずれのケースも水圧の消散速度が



(a) タイヤチップ



(b) 再生砕石

図-7 過剰間隙水圧の時刻歴波形

向上していることがわかる。

各ケースを比較すると、改良体積の多い5段の効果が顕著であり、下3段の効果が最も低かった。下3段の場合はドレーン材が地表まで達していないため、水圧が地表面方向に消散しにくく、未改良と同程度に水圧消散に時間を要したと思われる。しかしながら、地表への排水機能を設けた下3段改良では、その効果が大きく改善された。一方、ドレーン材による効果の違いをしてみると、透水性能の高いタイヤチップの方が高い消散効果を示すことが明らかとなった。

図-8は土のう型ドレーン材で囲まれた砂地盤の加振5回後の累積沈下量を示したものであり、初期地盤厚で除した百分率で表している。未改良地盤の約7%の沈下率に対し、ドレーン材を設置した場合にはいずれも沈下が低減されており、特にタイヤチップの低減効果が顕著であった。また、実験の観察より、地表付近にドレーン材が存在する場合、地盤の軟化とともにドレーン材自体が振動し、周囲の地盤変形を助長する現象が確認されており、

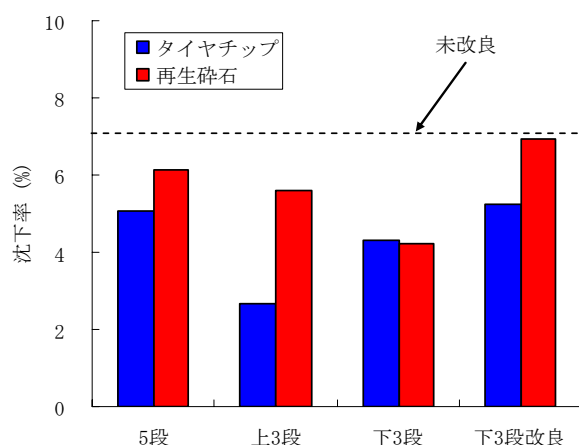


図-8 地盤の沈下

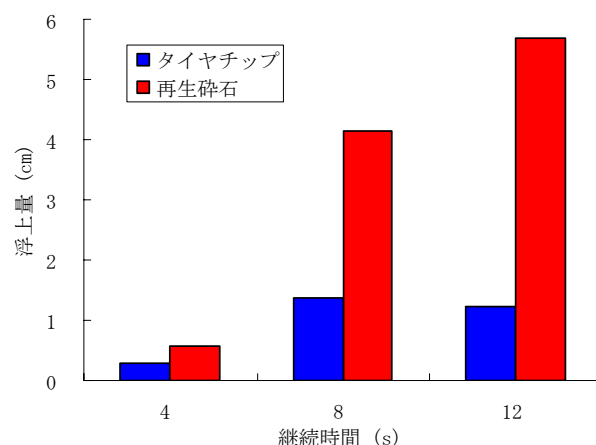


図-10 マンホールの浮上

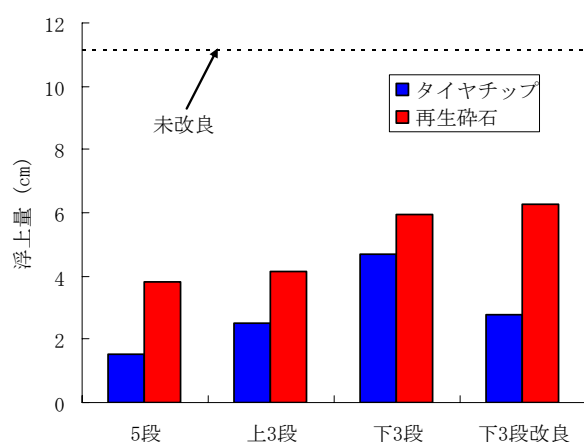


図-9 マンホールの浮上

特に密度の大きい再生砕石の方がその傾向が大きかった。そのため、5段や上3段に比べて、下3段改良は表層に付加したドレーン材の拘束が不十分であったため、その振動により沈下量が増大したものと考えられる。これらの理由により、図-7の過剰間隙水圧比の結果と相反するように、表層にドレーン材のない下3段の沈下量が比較的小さいという結果が得られた。

図-9は土のう型ドレーン材で囲まれた模型マンホールの加振5回後の累積浮上量を示したものである。同図より、ドレーン材を設置することにより、未改良に比べて顕著な浮上抑制効果が得られることが確認できる。まず、タイヤチップの結果に注目すると、5段、上3段、下3段改良、下3段の順に浮上量を抑制していることがわかる。これは、図-8の地盤沈下でも述べたように、地表面への排水能力の有無、およびその能力の大きさが過剰間隙水圧の消散時間に影響を与えたためと考えられる。一方、再生砕石の場合でも同様の傾向を示しているが、タイヤチップと比べて透水性能が低いため、その浮上抑制効果は低いことが明らかとなった。

つぎに、地震動の継続時間がマンホールの浮上に与える影響を検討するため、図-4と同様の装置を用いて模型振動実験を行った。入力波は最大加速度120galで5Hzの正弦波とし、加振時間は4s、8s、12sの計3パターンで検討を行った。なお、ドレーン材の積み重ね方は「5段」である。

図-10は模型マンホールの浮上量と地震動継続時間の関係を示したものである。同図より、再生砕石の場合では継続時間の増加に伴い浮上量が急激に増加しているのに対し、タイヤチップの場合では、その浮上量が大きく抑制されていることがわかる。過剰間隙水圧比の時刻歴波形より、タイヤチップの場合では、いずれの継続時間の場合でも、過剰間隙水圧比が1.0以下に抑制されており、その高い透水性が効果を発揮したものと考えられる。

ところで、粒径の大きいタイヤチップは透水係数が大きい一方で、間隙水圧の消散が長時間継続した場合に発生する目詰まりが懸念される。しかしながら、同図によればタイヤチップの場合は継続時間の増加にも関わらず高い浮上軽減効果を示しており、土のうによる目詰まり防止効果が十分機能したのと考えられる。

4. おわりに

本研究では、タイヤチップや再生砕石などのリサイクル材料を土のう袋に詰め込んだ土のう型ドレーン材を提案し、下水道マンホールの液状化時浮上軽減対策に利用することを目的として模型振動実験による検討を行った。土のう型ドレーン材の設置方法として、5段、上3段、下3段、下3段改良の4ケースによる比較検討を行った結果、下3段の対策効果は低かったものの、全てのケースでマンホールの浮上軽減効果を確認することができた。また、再生砕石とタイヤチップとを比較すると、高い水圧消散

効果を有するタイヤチップの方が浮上軽減効果が高いことが明らかとなった。以上、本工法の有効性を定性的に示すことができたが、今後は実地盤への適用に向けた検討が必要と考えられる。

謝辞:タイヤチップは北陸リトレッド株式会社より、再生クラッシャーランは南越建設工業株式会社よりご提供頂いた。ここに、記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 新潟県長岡市管路施設復旧委員会：管路施設震災復旧マニュアル，p. 11，2005.

- 2) 株式会社ブリヂストン：廃タイヤのリサイクル，
<http://www.bridgestone.co.jp/eco/report/images/pdf/2006/BS72-77.pdf>
- 3) 国土交通省：平成17年度建設副産物実態調査結果について，
http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha06/01/011208_2/01.pdf
- 4) 吉田雅穂，巨椋裕務，宮島昌克，北浦 勝：間隙水圧消散による液状化対策工法へのタイヤチップの適用に関する実験的研究，土木学会地震工学論文集（CD-ROM），Vol. 27，No. 237，6p.，2003.
- 5) 松岡 元：土を使った構造物 性能表示された「土のう」の活用，土木学会誌，Vol. 89，No. 1，pp. 52-54，2004.

(2007. 4. 6 受付)

EXPERIMENTAL STUDY ON COUNTERMEASURE AGAINST LIQUEFACTION-INDUCED FLOTATION OF MANHOLE USING RECYCLED MATERIALS PACKED IN SANDBAGS

Masaho YOSHIDA, Fukui National College of Technology
Masaru TONOO, Fukui City
Masakatsu MIYAJIMA, Kanazawa University
Masaru KITAURA, Kanazawa University

The 2004 Niigata-ken Chuetsu earthquake in Japan caused serious damage to sewage facilities such as uplift of manholes and settlement of pavement above backfill soil for pipes. This paper deals with shake table tests in a 1-g gravity field on application of recycled materials for ground improvement to mitigation of liquefaction-induced flotation of manhole during earthquakes. The recycled materials used in tests were tire chips made of waste tires and crushed gravels made of waste reinforced concrete, and they were packed in sandbags. From the test results, it was confirmed that the recycled materials packed in sandbags could be treated as one of the countermeasures to restrain the flotation of manholes and settlement of ground surrounded by sandbags.