

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

吉田雅穂¹・巨椋裕務²・宮島昌克³・北浦 勝⁴

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

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

²福井工業高等専門学校専攻科環境システム工学専攻（〒916-8507福井県鯖江市下司町）

E-mail:goldenoguch@hotmail.com

³金沢大学工学部教授（〒920-8667石川県金沢市小立野2-40-20）

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

⁴金沢大学工学部教授（〒920-8667石川県金沢市小立野2-40-20）

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

日本における廃タイヤリサイクル率は約90%と高いが、その発生量が年間1億本以上と多いため、廃タイヤ蓄積量は年々増加傾向にあり、その再資源化に関する検討が急務となっている。地盤内に発生する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、透水性の高い碎石等を地盤内に設置する工法が提案されているが、本研究は、廃タイヤを破碎したタイヤチップを碎石の代用材料として活用することを目的としている。模型振動実験を行った結果、碎石とタイヤチップの混合材料を地盤内に設置することにより、碎石単体の場合と同様な過剰間隙水圧の早期消散効果が認められ、液状化対策工法への利用の可能性を示すことができた。

Key Words: liquefaction, countermeasure, shaking table test, tyre chips, recycling, gravel drain

1. はじめに

液状化対策工法の一つに、各種ドレーン材を地盤中に設置することにより地盤の透水性を高め、地震時に地盤内で発生する過剰間隙水圧を早期に消散させることを目的とした、いわゆる間隙水圧消散工法がある。ドレーン材としては碎石や砂利等の自然材料を用いる場合が一般的であるが、排水機能付きの合成樹脂や鋼管等の人工材料を用いる工法も提案されており、多様化する構造物や設計法に応じて様々なドレーン材の検討がなされている。

本研究は、このドレーン材として廃タイヤを破碎して作製したタイヤチップを利用することを目的としており、タイヤチップのドレーン材としての諸特性を明らかにし、その液状化対策効果について模型振動実験により検討を行うものである。

2001年の日本におけるタイヤリサイクルの状況¹⁾は

図-1のとおりであり、リサイクル率は89%と高いが、年間の総発生量が1億700万本（105万3,000トン）と多いため、その他に含まれる用途不明分、すなわち未利用の廃タイヤ蓄積量は年々増加傾向にあり、その再資源化に関する対応が急務となっている。同図に示すように、廃タイヤは様々な用途に利用されているが、土木材料への適用例としては、タイヤチップを道路の舗装材や地盤の排水材に利用するマテリアルリサイクルが主に行われている。例えば、渡辺ら²⁾はタイヤチップの地盤排水材としての有効性を実験的に明らかにしており、現在では駐車場やテニスコートの暗渠排水材として実施されるまでに至っている。なお、タイヤチップの環境への影響に関しては、廃タイヤカット片の溶出試験の結果より、公共用水域に排出する場合の排水基準に比較してはるかに低濃度であることが確認されている³⁾。

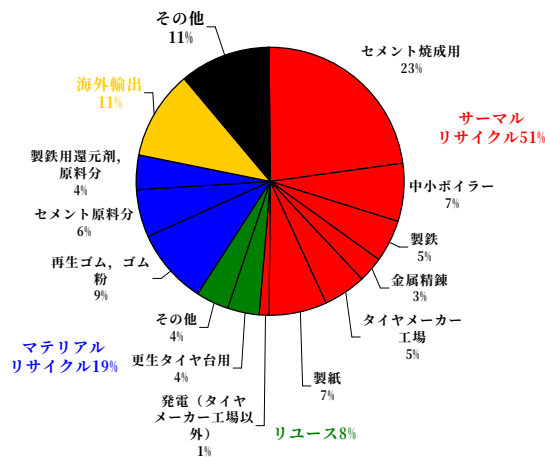


図-1 2001年のタイヤリサイクル状況

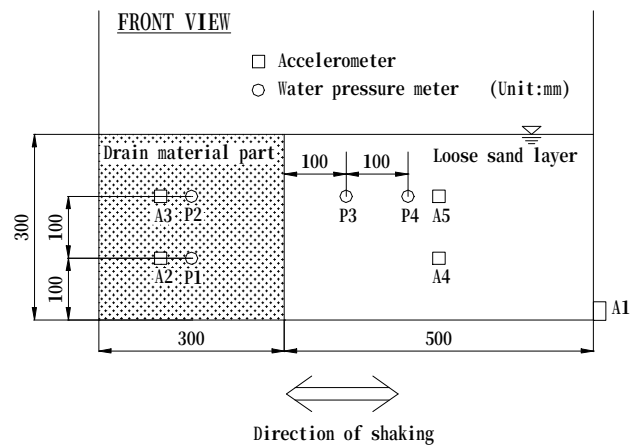


図-2 模型地盤の概要

2. タイヤチップの透水性能

タイヤチップのドレーン材としての諸特性を明らかにするため、図-2に示す模型地盤を用いて振動実験を行い、タイヤチップによる過剰間隙水圧の消散効果について検討を行った。同図の右側は珪砂7号を用いて水中落下法により作成した緩詰めの飽和砂地盤であり、左側の網掛け部分がドレーン部となっている。ドレーン材としては、写真-1に示すタイヤチップと、排水材として一般的に利用されている碎石7号の2種類を用いた。なお、本実験では廃タイヤを剪断式破砕機に通して作製した一次処理後の5cm角程度のタイヤチップを用いており、これを50mmふるいを通して19mmふるいに留まる粒度に調整した。各材料の物理定数は表-1に示すとおりである。また、写真-2に示すように各ドレーン部の表面上に100kgfのおもりを載せ、飽和砂地盤の約50cmの土被りに相当する約0.8N/cm²の上載圧を作用させた場合と、ドレーン部を設置しない飽和砂層だけの場合の計5ケースの実験を行った。入力波は図-3に示すように5Hzの正弦波を20波とし、80gal, 100gal, 100gal, 120gal, 100gal, 80galと最大加速度を順次変化させ、同一地盤に対し計6回の加振を行った。

図-4は飽和砂層内のP3とドレーン部内のP2の位置における過剰間隙水圧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。同図よりドレーン材を設置した場合には、いずれのケースも飽和砂層部における水圧の消散時間が短縮されていることがわかるが、その最大値や継続時間に着目すると、タイヤチップだけの場合では碎石に匹敵する消散効果は確認できず、さらにドレーン部では加振中に動水圧が発生しその後水圧が上昇する現象が見られた。一方、上載圧を作用させた場合では、特にタイヤチップの場合において過剰間隙水圧



写真-1 タイヤチップ

表-1 各材料の物理定数

材料	ドレーン材		
	珪砂7号	碎石7号	タイヤチップ
密度 ρ (g/cm ³)	2.63	2.67	1.26
平均粒径 D_{50} (mm)	0.16	3.65	約50
透水係数 k (cm/s)	4.79×10^{-3}	1.18	3.79

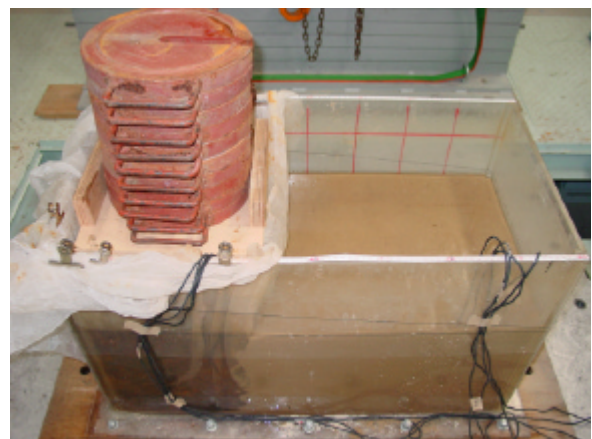


写真-2 上載圧を作用させた実験

が大きく低減される結果となった。

図-5は各ケースの飽和砂地盤全体の地表面沈下率(地盤沈下量を初期地盤厚で除した値の百分率)の平均値を示したものであり加振6回後の結果である。同図より、タイヤチップの場合が全ケースの中で最も

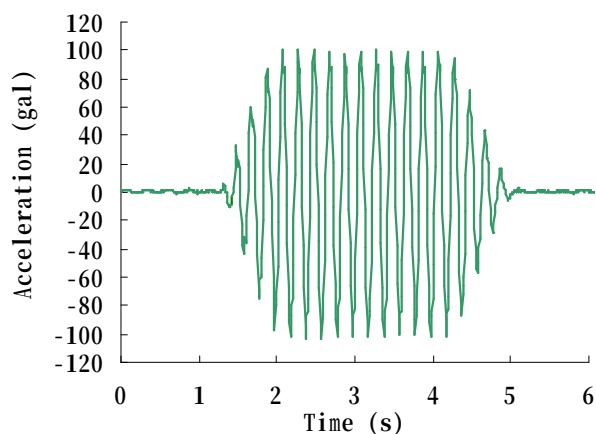
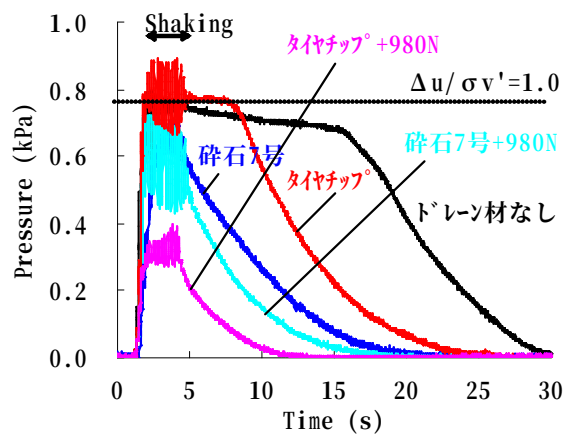


図-3 入力加速度の時刻歴波形

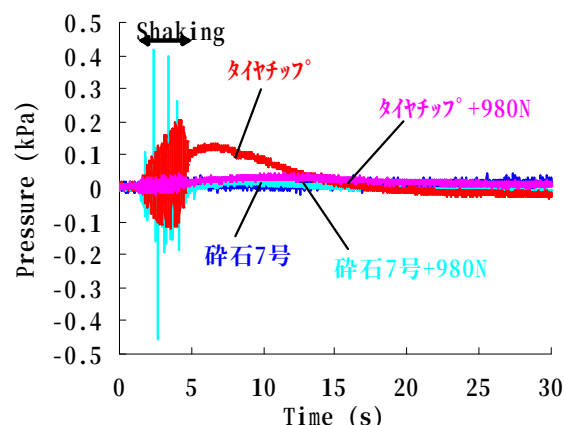
沈下率が大きく、ドレーン材なしの場合を上回る結果となっている。しかし、上載圧を作用させた場合には碎石と同等、さらに上載圧の作用していない碎石を上回る沈下抑制効果が発生していることがわかる。

これらの現象の原因として以下のようなことが推測される。タイヤチップは碎石に比べて密度が小さく弾性があり、また粒径が大きいのでドレーン部として形成した時の間隙が大きい。したがって、大きな地震力を受けるとタイヤチップの粒子構造が不安定となる。図-6は各加振時のドレーン部のA2の位置での、入力加速度に対する加速度応答倍率を示したものである。例えば、加振2回目に着目すると、タイヤチップは碎石と比べて10%程度大きな応答倍率を示している。これにより、タイヤチップの振動によりドレーン部でも過剰間隙水圧が発生し、飽和砂層で発生した過剰間隙水圧との動水勾配が相対的に小さくなり、水圧消散効果が低減したと考えられる。一方、上載圧を作用させた場合の応答倍率は、両ケースともタイヤチップを下回り碎石と同等の値に軽減されていることがわかる。したがって、上載圧により粒子結合が強固になりドレーン部での過剰間隙水圧の発生が抑制され、かつ元来有するタイヤチップの高い透水性能により飽和砂層における過剰間隙水圧の発生が抑制されたと考えられる。これらのことは、図-5に示した地表面沈下率にも同様に影響を与えていると考えられるが、タイヤチップの場合においてドレーン材なしの場合よりも沈下率が大きくなった原因としては、間隙が大きくドレーン部の剛性が小さいことにより、液状化した地盤がドレーン部側に変形したためと思われる。

ところで、表-1に示すようにタイヤチップはその粒径の大きさにより碎石7号を上回る透水係数を示していたが、弾性体であるゴムの変形特性が透水性



(a) 飽和砂層部：P3



(b) ドレーン部：P2

図-4 過剰間隙水圧の時刻歴波形

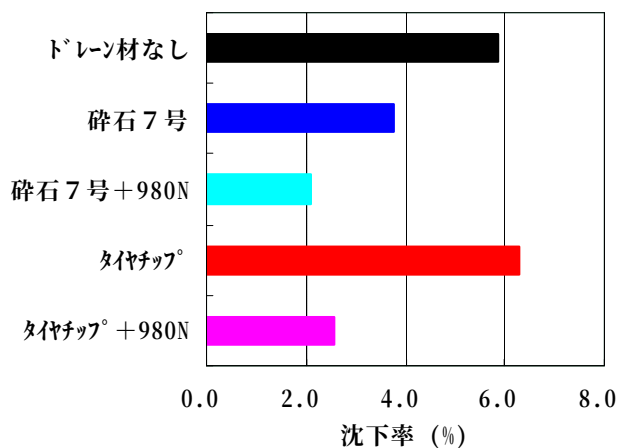


図-5 飽和砂地盤の地表面沈下率

能に与える影響が懸念された。そこで、試料上部より载荷した状態で通水する定水位透水試験を、次章で扱う小さいタイヤチップを用いて行った。図-7は上載圧に伴う透水係数の変化を示したものである。同図より、小さいタイヤチップの場合では上載圧の増加に伴い透水係数が低減する傾向が見られたが、前述の模型実験で用いた最大上載圧約0.8N/cm²の時でも、小さいタイヤチップの方が碎石の透水係数を

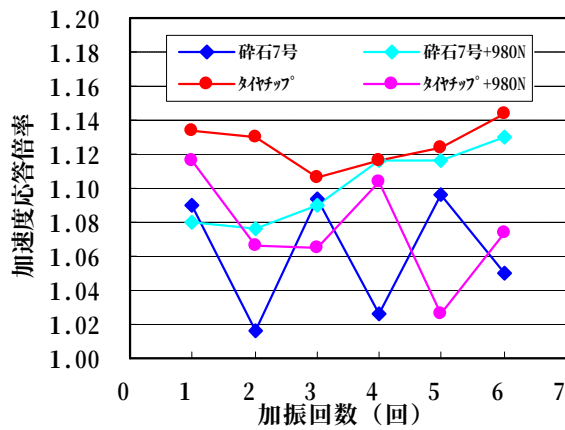


図-6 ドレーン部の加速度応答

上回っていることが確認できた。したがって、上載圧がタイヤチップの透水性能に与える影響は比較的少ないと考えられる。

3. タイヤチップと砕石の混合利用

前章ならびに既往の実験結果⁴⁾より、粒径の大きいタイヤチップを単体で利用することには種々の問題があることが明らかとなった。そこで本章では、前章で用いたタイヤチップをカッターでさらに切断し、粒径を10～16mmに調整した小さいタイヤチップ(写真-3参照)と砕石7号との混合材料をドレーン材として用いることにした。そして、図-8に示す模型地盤の網掛け部分のように、上述の混合材料を詰めた口の字形の改良体を地盤中に設置する工法を提案し、改良体内および改良体周辺の液状化対策効果について実験的に検討を行った。改良体は写真-4に示すように、ステンレス製の網(網目間隔2mm)を口の字型に組んで中空の籠を作製し、外面には目詰まり防止用のナイロン製のネット(網目間隔276 μm)を施し、その中にドレーン材を突き棒で敷き詰めて作製した。ドレーン材の種類は表-2に示すとおりであり、小さいタイヤチップと砕石の混合割合を重量比で定義し計4ケース設定した。小さいタイヤチップの物理定数は表-3に示すとおりであり、砂と砕石は前章の実験と同様である。

ここで、次式は現在広く用いられている間隙水圧消散工法の排水材選定基準式⁵⁾である。

$$D_{G15} / D_{S85} < 9 \quad (1)$$

ただし、 D_{G15} ：排水材の15%粒径

D_{S85} ：ドレーン周辺土粒子の85%粒径

本実験の砂地盤に用いる珪砂7号と各ドレーン材との粒径の関係により上式の左辺の値を求めると、砕石7号の場合は9.57、小さいタイヤチップの場合

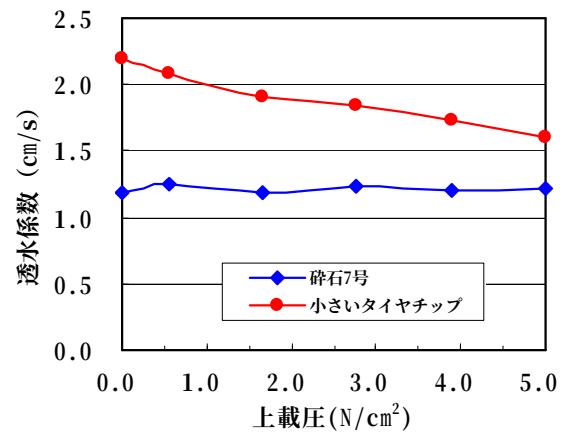


図-7 上載圧の増加に伴う透水係数の変化

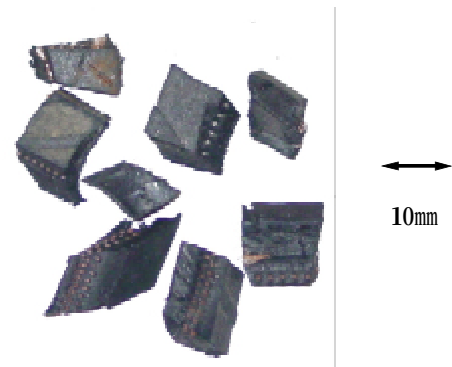


写真-3 小さいタイヤチップ

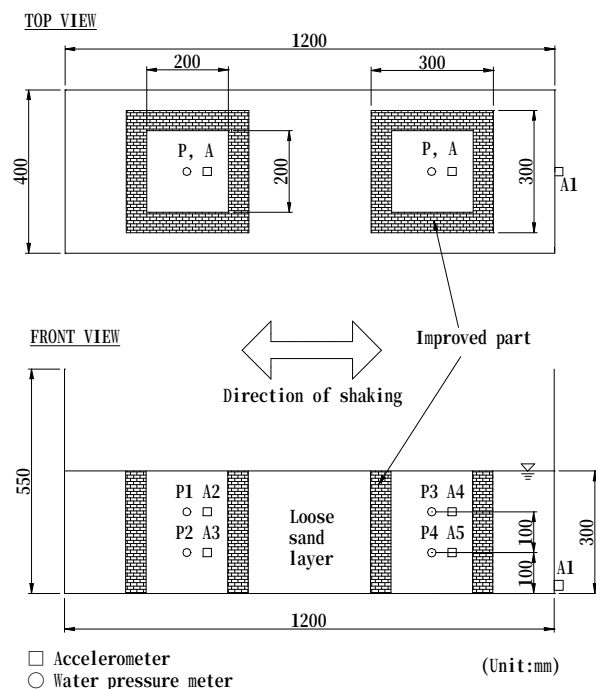


図-8 模型地盤の概要

は23.9、混合比1:3の場合は9.78、混合比1:5の場合は9.22、混合比1:7の場合は9.13となる。いずれも、基準式を満たしていないが、砕石単体および混合材料の場合は基準値である9に近く、本研究では



写真-4 ロの字型改良体

表-2 改良体の条件

改良体の種類	ドレーン材の混合割合	
	小さいタイヤチップ(kgf)	砕石7号(kgf)
混合比1:3	6.0	18.0
混合比1:5	4.5	22.5
混合比1:7	3.5	24.5
砕石7号	0.0	32.0

表-3 小さいタイヤチップの物理定数

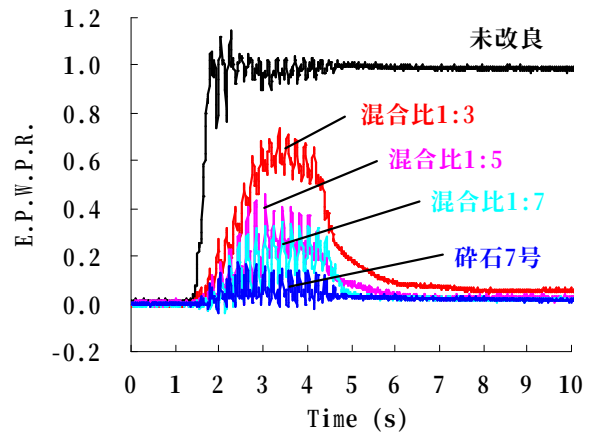
材料	ドレーン材
	小さいタイヤチップ
密度 ρ (g/cm ³)	1.15
平均粒径 D_{50} (mm)	8.05
透水係数 k (cm/s)	2.20

これをほぼ妥当な材料と判断して利用した。

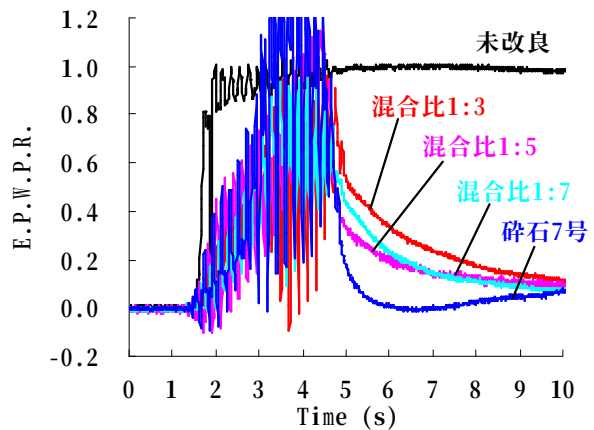
入力波は前章の実験と同様であり、80gal, 100gal, 120gal, 140gal, 160galと最大加速度を順次変化させ、同一地盤に対し計5回の加振を行った。

図-9は各ケースのP1の位置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、図-9(a)は加振2回目(100gal)、図-9(b)は加振3回目(120gal)の結果の一例である。まず、100gal入力時を見てみると、未改良の場合に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、改良体を設置した場合には、いずれのケースも約4秒間に短縮されており、著しい消散効果が確認できた。混合材料の場合には砕石7号に比べてその効果が低減していたが、混合する砕石の割合を増加することによって、その効果が向上することが明らかとなった。一方、120gal入力時では、いずれの改良体の場合も液状化に至っているが、未改良に比べて水圧は加振終了とともに速やかに消散しており、その高い消散効果が確認できた。

図-10は各ケースの改良体で囲まれた内側にある砂地盤の地表面沈下率を示したものである。図-10(a)の加振2回後の結果を見ると、図-9(a)に示したように未改良地盤では液状化が発生し、そのため大きな地盤沈下が発生しているが、改良体を設置した場合にはいずれも液状化に至っておらず、地盤沈下



(a)100gal : P1



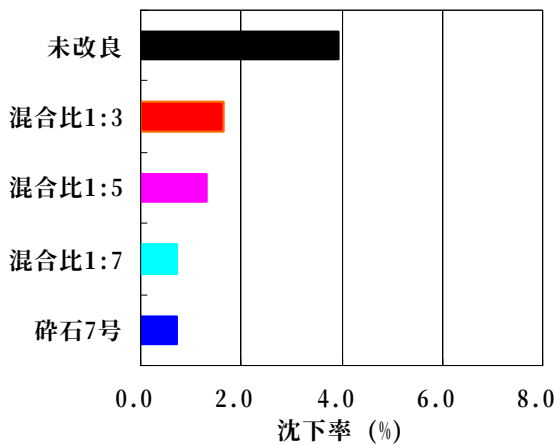
(b)120gal : P1

図-9 過剰間隙水圧比の時刻歴波形

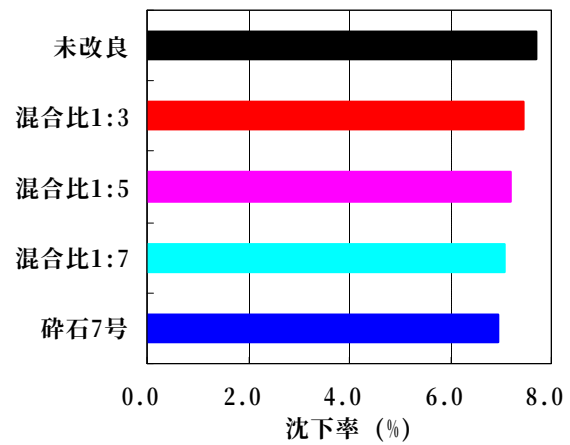
も大きく低減されていることがわかる。また、過剰間隙水圧比の発生状況と同様に、砕石7号の場合が最も沈下率が小さく、混合材料の場合では砕石の割合の増加に伴い地盤沈下も低減されることがわかる。一方、図-10(b)の加振5回後の結果では、いずれの改良体の場合も未改良と同程度の沈下率となっていた。したがって、図-9(b)に示したように、入力加速度が増加しても改良体による過剰間隙水圧消散効果は得られるが、一旦液状化してしまえば未改良地盤と同等の地盤沈下が発生することがわかった。以上より、地盤沈下は液状化の程度の影響を受けるが、本実験条件の範囲内では、混合比1対7の場合において砕石単体と同程度の液状化対策効果が期待できることが明らかとなった。

4. おわりに

本研究では、間隙水圧消散による液状化対策工法のドレーン材として、廃タイヤを破碎したタイヤチップを活用することを目的とし、模型振動実験に



(a)加振2回後



(b)加振5回後

図-10 改良体の内側地盤の地表面沈下率

よりその有効性について検討を行った。

その結果、一次破碎後のタイヤチップを単体で利用した場合、粒径の大きさ、密度の小ささ、ゴムの弾性等の物理的特性によって、碎石に匹敵する高い間隙水圧消散効果が得られないことが明らかとなった。しかしながら、タイヤチップを碎石と混合利用し、本実験条件においては、10mm程度の粒径に調整したタイヤチップを碎石7号との重量比で1対7程度に混合することにより、碎石単体の場合と同等の効果が得られることが明らかとなった。すなわち、タイヤチップの粒径と碎石との混合割合を適切にすることにより、液状化対策工法への活用の可能性を示すことができた。

今後は、対策効果の影響範囲や地中構造物の浮上防止対策への適用、さらにレベル2地震動への対応などについて検討していく予定である。

謝辞：タイヤチップは北陸リトレッド株式会社よりご提供頂いた。また、実験では福井高専元学生の小関隆行君、青山憲二君、小林聖武君の協力を得た。

なお、本研究は文部科学省科学研究費補助金（若手研究（B）、No.14750421）の補助を受けて実施されたものである。ここに、記して謝意を表する。

参考文献

- 1) ブリジストン トラックバスネット http://www.bs-truck-bus.net/ra2002.11_01.html
- 2) 渡辺康二, 辻子裕二, 三村義雄, 井上隆宣, 松井尚子: 地盤材としての廃タイヤの再資源化に関する実験的研究, 土木学会第54回年次学術講演会講演概要集, 第7部, pp.496-497, 1999.
- 3) 日本自動車タイヤ協会, 日本タイヤリサイクル協会: タイヤリサイクルハンドブック リサイクル技術, p.30, 2000.
- 4) 吉田雅穂, 宮島昌克, 北浦 勝: タイヤチップを利用した液状化対策工法に関する基礎的実験, 第37回地盤工学研究発表会平成13年度発表講演集, pp.2055-2056, 2002.
- 5) 大野義郎, 伊藤克彦, 南川洋士雄, 大北康司: 碎石ドレーンの短期目詰まり限界について, 第19回土質工学研究発表会, pp.191-192, 1984.

(2003.6.30受付)

EXPERIMENTAL STUDY ON A COUNTERMEASURE AGAINST LIQUEFACTION USING TYRE CHIPS AS A METHOD OF PORE WATER PRESSURE DISSIPATION

Masaho YOSHIDA, Hiromu OGURA, Masakatsu MIYAJIMA and Masaru KITaura

About 90% of tyre wastes are recycling in Japan. However, stocks of them are increasing, because the amount of tyre wastes is well over one hundred million. It is considered that additional recycling and reuse of tyres are essential. The gravel drain system is installed to increase the permeability of sandy ground as a countermeasure against liquefaction. Shaking table tests were conducted to clarify whether chips made by shredding the rubber of tyre could be used as gravels made by crushing the stones. As a result, excess pore water pressure in sandy ground was decreased by permeability of improved layer which was made by mixing the tyre chips into the crushed stones.