

タイヤチップによる飽和砂地盤の 免震効果に関するオンライン地震応答実験†

金子 崇* 兵動 正幸* 中田 幸男**
吉本 憲正** ハザリカヘマンタ***

On-Line Pseudo-Dynamic Response Test for Evaluating Seismic Isolation Effect by Tire Chips on Response of Saturated Sand Deposits

by

Takashi KANEKO*, Masayuki HYODO*, Yukio NAKATA**,
Norimasa YOSHIMOTO** and Hemanta HAZARIKA***

The volume of waste tires is increasing every year and it has become a major environmental problem. In the use as a heat source which is the mainstream of recycling, there are problems, such as waste of rubber resources and generating of carbon dioxide. Therefore, increasing attention has been paid in recent years on the technology of using scrap tire derived recycled products (tire shreds and tire chips) in construction. With characteristics such as lightweight, compressible, permeable, durable and thermally insulating, this material has a myriad of applications in civil engineering. This research attempts to exploit the potentials of tire chips as a tool to attenuate the earthquake loading propagating through the foundation soils. Online testing is a method of feeding soil response characteristics directly from soil samples into a modeling algorithm. The effects of the layer thickness of tire chips, configuration and degree of mixing between tire chips and sand on the earthquake characteristics of alternating layers of sand and tire chips have been investigated. As a result, it was confirmed that tire chip layers attenuate the motions of sand layers for short period vibrations increasing strain in overlying sand layers. Moreover, tire chip layers which were closer to the bottom or greater thickness tended to decrease the surface accelerations.

Key words : Tire chips, Seismic Isolation, Recycle, Liquefaction, Pseudo-dynamic test

1 緒 言

現在、我が国では年間約 100 万 t の廃タイヤが発生しており、その約 88% がリサイクルされている。しかし、その大半は燃料として利用するサーマルリサイクルであり、二酸化炭素や焼却灰の発生などの課題が残っている。主に利用されているセメント分野での需要も頭打ちであり、今後はサーマルリサイクル率の低下が予想されている。そのため、土木分野では大量消費が可能なマテリアルリサイクルの方法として、新しい地盤材料としての利用が検討されている。廃タイヤは用途によって裁断される大きさが異なるが、それらは粒径の大きいものから、ホールタイヤ、タイヤシュレッズ、タイヤチップ、ゴム粉と分類される。

具体的利用として以下のような検討が行われてきた。

福武ら¹⁾はホールタイヤに粒状材の中詰めをしてタイヤのフープ・テンション力による拘束効果を利用して盛土等の安定性の向上を図る方法を検討した。菊池ら²⁾は、固化処理土にタイヤチップを混合してぜい性的破壊を余儀なくされていた固化処理土に大きなじん性を保持する

ことに成功した。また、ハザリカ³⁾はタイヤの高い変形追随性を利用してケーソン式岸壁の裏込め材としてタイヤチップを用いることを検討した。その検証として大型水中振動台による振動実験を行い、タイヤチップの裏込め材としての利用が、地震時の土圧低減、残留変位抑制、液状化防止等に効果的であることを確認し、港湾・空港構造物の耐震補強工法としての有用性を示した。また、御手洗ら⁴⁾は岸壁裏込め材に振動吸収性能を持たせる目的で、タイヤチップを礫材に混入し、小型の FWD (Falling Weight Deflect-meter) 装置⁵⁾を用いた試験を行うことで、タイヤチップによって衝撃圧緩衝効果が得られることを示している。

さらに、近年タイヤチップを砂中に混合することにより砂の液状化を防止または軽減することが考えられた。筆者らの研究グループ⁶⁾は砂とタイヤチップを種々の割合に混合し一連の非排水繰返し三軸試験を行った。その結果、タイヤチップは繰返しせん断による過剰間隙水圧の蓄積を抑制する効果を有し、その程度はタイヤチップの割合が大きいほど顕著であることを確認した。

† 原稿受理 平成 21 年 5 月 11 日 Received May 11, 2009 ©2010 The Society of Materials Science, Japan

* 山口大学大学院理工学研究科 〒755-8611 宇部市常盤台, Dept. of Civ. Eng., Yamaguchi Univ., Tokiwadai, Ube, 755-8611

** 正 会 員 山口大学大学院理工学研究科 〒755-8611 宇部市常盤台, Dept. of Civ. Eng., Yamaguchi Univ., Tokiwadai, Ube, 755-8611

*** 秋田県立大学大学院システム科学技術研究科 〒015-0055 由利本荘市土谷 Graduate School of System Sci. and Tech., Akita Pref. Univ., Tsuchiya, Yurihonjo, 015-0055

本研究は、さらにタイヤチップの高いダンピング性能、振動吸収性能に着目し、地震時の飽和砂地盤の液化化防止と免震効果を発現させる有効な方法について検討を行ったものである。Tsang⁷⁾は、構造物に入射する地震力の軽減のために、基礎周辺砂地盤にタイヤチップを75%混合した地盤モデルを想定し、混合砂の層厚や動的変形特性、構造物の階層数や幅、基礎の根入れ長を変えて一連の数値シミュレーションを行った。その結果、地震時の水平および垂直振動が未改良地盤に比べて、それぞれ60%~70%、および80%~90%抑えられることを示した。しかし、この結果はあくまで解析によるもので、物性も仮想のものであり、実験的検証を得たものではない。

本研究は、構造物の基礎となる砂地盤そのものの液化化防止および免震を図ることを目的に、水平地盤を対象に、オンライン地震応答実験を行ったものである。本研究では、タイヤチップのより適切な混合および配置を解明するために、タイヤチップと砂との混合地盤またはそれらの互層地盤として、タイヤチップの混合率やタイヤチップを独立した層として配置した場合の層序や層厚を変化させ検討を行った。

2 オンライン地震応答実験の概要

オンライン地震応答実験の概要を Fig. 1 に示す。オンライン地震応答実験とは、要素試験としての単純せん断試験と地震応答解析を同時に行うものであり、応答解析から得られた応答変位を単純せん断試験に与え、単純せん断で求められた復元力を応答解析にフィードバックする操作を逐次行っていくものである。⁹⁾オンライン地震応答実験は、以下のように行う。本研究では、6連の単純せん断試験機を用い、Fig. 2 のように多質点系にモデル化した地盤を対象とした。まず、オンライン層各層の初期応力を各単純せん断試験機に与える。次に基盤面から地震動を入力し、支配運動方程式を時系列で解き、各時間ステップで応答変位を求める。得られた応答変位に相当するせん断ひずみを供試体に与え、試験により得られた復元力を運動方程式にフィードバックして、次のステップの応答変位を算出する。すなわち、本手法はこれらの過程を地震動が継続する間繰り返す事で、時々刻々に変化する地盤の非線形な復元力を要素試験の供試体から直接

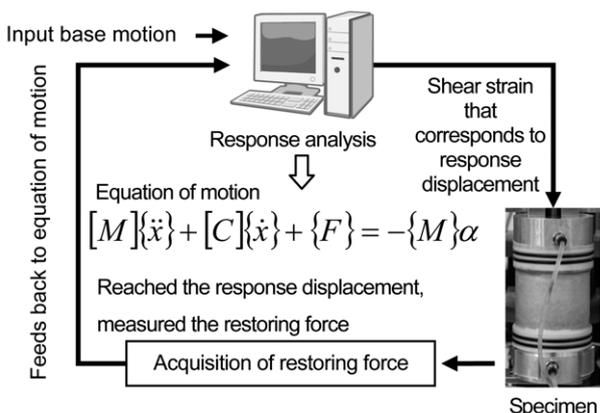


Fig. 1 Outline of On-line Pseudo-dynamic Response Test.

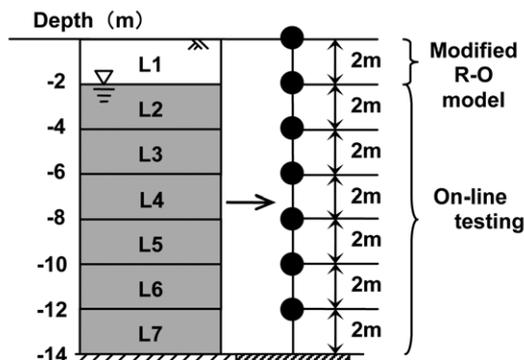


Fig. 2 Modeling of the ground.

求め、それをオンラインで応答解析に結びつけて地震時の地盤挙動を再現するものである。なお、本システムの要素実験部分は、日下部⁹⁾により開発された簡易直接せん断試験機を用いた。簡易直接せん断試験機では、せん断時に非排水状態で鉛直方向の変位が生じないようにし、側圧一定でせん断している。そのため、体積ひずみゼロ、鉛直ひずみゼロ、という条件から水平方向のひずみがゼロとなり、単純せん断条件を満たすと判断している。

本研究では、廃タイヤの金属・繊維類を除去し、粒径が1mm以下となるように裁断したタイヤチップと相馬珪砂、およびタイヤチップと相馬珪砂の混合砂を用いて実験を行った。各試料の物理的性質を Table 1 に示す。図表中の S と T の表記は、それぞれ砂とタイヤチップを表している。タイヤチップの比重は $G_s = 1.150$ であり、一般的な地盤材料よりも相当小さい。また、最大・最小間隙比が大きくなっているのは、タイヤチップの形状とゴム特有の摩擦力の高さによると考えられる。混合砂は体積比で相馬珪砂 (S) : タイヤチップ (T) = 7 : 3, 5 : 5 となるように作製した。このとき、乾燥質量比は相馬珪砂 : タイヤチップ = 84 : 16, 70 : 30 となる。Fig. 3 に粒径加積曲線を示すが、混合砂の粒度分布特性 (d_{50} , U_c) は相馬珪砂のそれに近い。

供試体は初期含水比 $w = 10\%$ のもと湿潤突固め法により作製した。まず、乾燥した相馬珪砂とタイヤチップを所定の体積比で混合し、含水比 $w = 10\%$ となるよう水を加え、均一になるように十分に混ぜた。次に、ペDESTアルにゴムスリーブを装着し、高さ4cm、直径6cmのモールドを取り付け、試料を2層に分けて投入し、次式で示す突固めエネルギー E_c を制御して作製した。

$$E_c = \frac{W_R \cdot H \cdot N_L \cdot N_B}{V} \quad (1)$$

ここに、 W_R はランマー重量 (0.00116kN)、 H は落下

Table 1 Physical properties of materials.

Materials	G_s	e_{max}	e_{min}	$d_{50}(mm)$	U_c
Soma sand (S:T=10:0)	2.645	1.077	0.680	0.395	1.65
S:T=7:3	2.410	1.565	0.953	0.407	1.69
S:T=5:5	2.192	1.948	1.218	0.423	1.75
Tire chips (S:T=0:10)	1.150	2.502	1.786	0.785	2.34

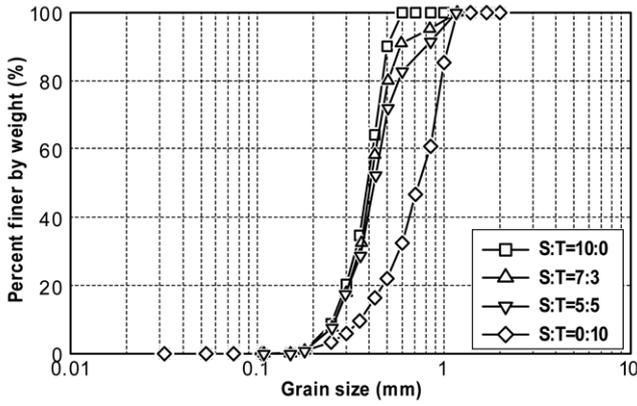


Fig. 3 Grain size distribution of materials.

高さ (0.1844m), N_L は層数, N_B は 1 層毎の突固め回数 (22 回), V は供試体の体積 (m^3) である. 突固めエネルギーの設定は相馬珪砂の供試体において相対密度が 50% となる条件と等価とした.

本研究では, 地下水面以下を 6 層に分けてオンライン層として要素試験を行い, 表層を修正 R-O モデルによる不飽和解析層とした. Table 2 に示すように要素試験を行うオンライン層の L2 ~ L7 層を対象として, 砂とタイヤチップの混合割合や層序, 層厚を変化させて実施した. 不飽和解析層の修正 R-O モデルに必要なパラメータは神戸ポートアイランドの地盤データ¹⁰を基に Table 2 に示すように決定した. 入力波には Fig. 4 に示す加速度の最大値を 500Gal に調整した八戸波を用いた.

3 混合地盤での混合率の影響

まず, 砂とタイヤチップを混合した地盤に対する地震応答について検討した. 混合率の影響を検討するためタイヤチップの砂との体積混合率は Table 2 に示すように 0%, 30%, 50%, 100% とした.

Fig. 5 にそれぞれのタイヤチップ配合率からなる混合

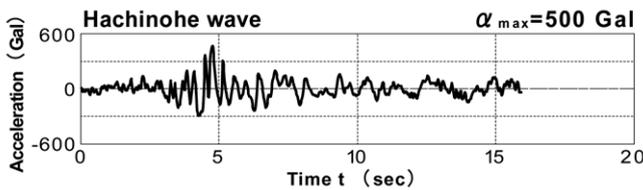


Fig. 4 Input base motion.

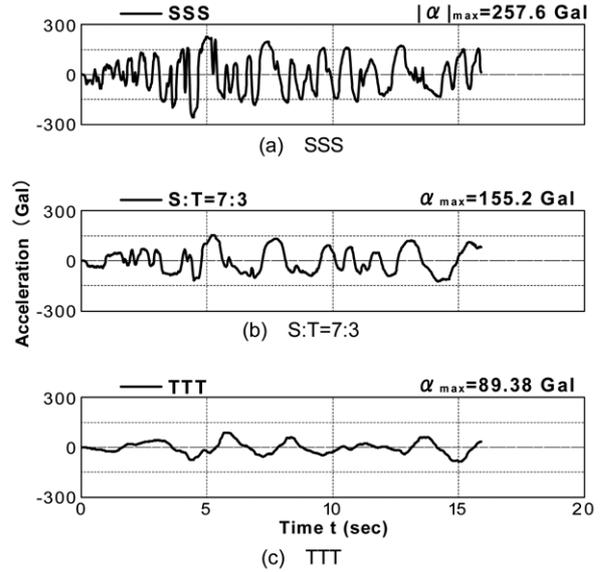


Fig. 5 Acceleration time history in ground surface.

地盤の地表面での応答加速度の時刻歴を示す. 全層砂の場合 SSS で応答加速度は最も高く, タイヤチップを混合することで地震波は減衰・長周期化している. これは, タイヤチップを混合することで混合地盤の剛性が低下し, 地震動の短周期成分の伝搬を抑制したためと考えられる. タイヤチップの混合率が高いほど剛性は低下するため, その効果が強く発揮され, 全層タイヤチップの場合 TTT では加速度の最大値は全層砂とした場合 SSS の 3 分の 1 にまで減衰している.

Fig. 6 に地表面における応答加速度のフーリエスペクトルを示す. 破線は入力波である八戸波の加速度フーリエスペクトルを, 矢印はそれぞれ八戸波と各実験ケースにおける地表面でのスペクトルの最大点を示している. 全層砂の場合 SSS では 3Hz 付近でスペクトルの減少がみられるが, 1Hz 付近での増加が著しく, 卓越周波数は 1Hz となっている. 一方, タイヤチップを混合することにより 1Hz 以上での成分の減少が顕著となり, 応答加速度は長周期化する傾向が認められる. タイヤチップの割合が高くなるほど長周期化の傾向は強くなり, (c) 全層タイヤチップの場合 TTT では短周期成分はほとんど消失し, 卓越周波数でのスペクトルも小さくなっていることが確認できる.

Table 2 Test Configurations.

Layer	Test Case								
	□ SSS	△ S:T=7:3	▽ S:T=5:5	◇ TTT	■ TSS	◆ STS	● SST2m	▲ SST4m	▼ SST6m
L1	Unsaturated analysis layer ($\gamma_t=17.64kN/m^3$ $G_0=52MPa$ $\tau_f=12kPa$ $\alpha=2.31$ $\beta=2.21$)								
L2	Soma sand	Mixture (T30%)	Mixture (T50%)	Tire chips	Tire chips	Soma sand	Soma sand	Soma sand	Soma sand
L3	Soma sand	Mixture (T30%)	Mixture (T50%)	Tire chips	Tire chips	Soma sand	Soma sand	Soma sand	Soma sand
L4	Soma sand	Mixture (T30%)	Mixture (T50%)	Tire chips	Soma sand	Tire chips	Soma sand	Soma sand	Soma sand
L5	Soma sand	Mixture (T30%)	Mixture (T50%)	Tire chips	Soma sand	Tire chips	Soma sand	Soma sand	Tire chips
L6	Soma sand	Mixture (T30%)	Mixture (T50%)	Tire chips	Soma sand	Soma sand	Soma sand	Tire chips	Tire chips
L7	Soma sand	Mixture (T30%)	Mixture (T50%)	Tire chips	Soma sand	Soma sand	Tire chips	Tire chips	Tire chips

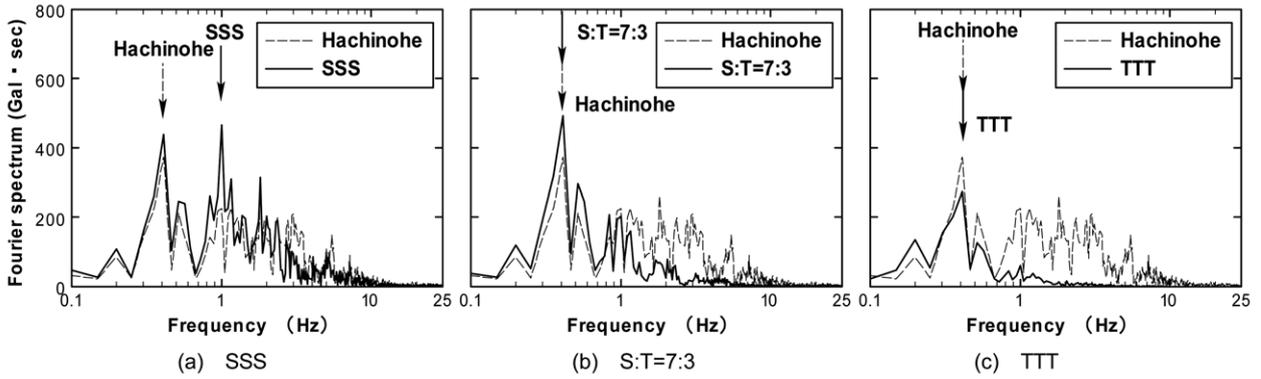


Fig. 6 Fourier spectrum of acceleration in ground surface.

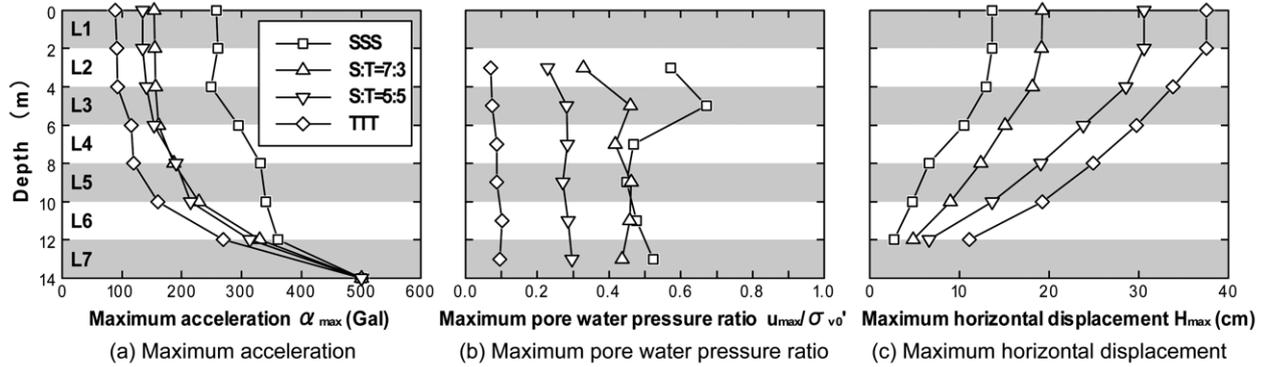


Fig. 7 Depth distribution of each parameter.

Fig. 7 に最大応答加速度・最大過剰間隙水圧比・最大応答水平変位の深度分布を示す。図 (a)において、最大応答加速度はタイヤチップの混合により大きく減少し、タイヤチップを30%混合するだけでも著しく低減することが確認できる。また、最大過剰間隙水圧比は図 (b) に示されるように全層砂の場合 SSS においては、浅層 (L2・L3) で最大0.7程度まで上昇しているが、タイヤチップを30%混合した場合 $S:T = 7:3$ においては、浅層では、全層砂の場合 SSS と比べて低くなっているが、中・深層 (L4～L7) ではほとんど変わらない結果となっている。しかし、タイヤチップを50%混合した場合 $S:T = 5:5$ には、最大過剰間隙水圧比は0.3程度に抑えられ、液状化抑止効果が発揮されていることが確認できる。さらに、全層タイヤチップとした場合 TTT では0.1にまで抑えられている。一方、図 (c) に示されるように最大応答水平変位は、いずれもタイヤチップ混合率が高いほど表層に向けて変位が増大する傾向が認められる。これは、タイヤチップの混合率が高いほど地盤の剛性が低下するためと考えられる。

4 互層地盤でのタイヤチップの層厚、層序の影響

次に、タイヤチップを層として配置した場合にタイヤチップ層の層序、層厚が地震応答に与える影響について検討した。そのため、Table 2 に示すように、浅層 (L2・L3)、中層 (L4・L5)、深層 (L6・L7) をそれぞれタイヤチップ層とした場合や最下層のタイヤチップ層の層厚を2m、6mに変化させた場合について実験を行い、全層砂とした場合 SSS、全層タイヤチップとした場合 TTT

とあわせて比較した。なお、実験ケース名 SST の表示の後ろに続く数字は最下層にタイヤチップ層を配置した場合のタイヤチップ層の層厚を表したものであり、最下層に4mのタイヤチップ層を配置した場合は SST4m と表記している。

Fig. 8 に地表面での応答加速度の時刻歴を示す。タイヤチップを層として配置した場合、いずれの実験ケースにおいても、地震波は減衰・長周期化しており、タイヤチップ層が深い位置にあるほど、また、その層厚が厚いほど減衰・長周期化の傾向は強くなっている。

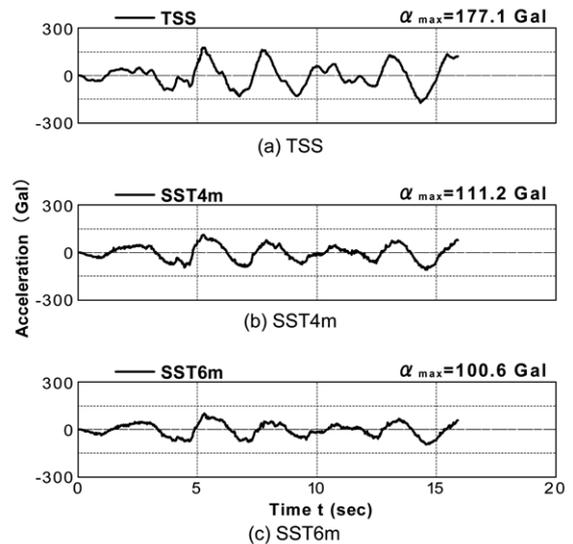


Fig. 8 Acceleration time history in ground surface.

Fig. 9 に地表面での応答加速度のフーリエスペクトルを示す。タイヤチップを層として配置した場合は、いずれの実験ケースにおいても、1Hz以上のスペクトルの減少がみられ、長周期化が確認できる。最大スペクトルもタイヤチップ層が深い位置にあるほど、また、その層厚が厚いほど小さくなっている。

Fig. 10 に最大応答加速度・最大過剰間隙水圧比・最大応答水平変位の深度分布を示す。図 (a)において、最大応答加速度はタイヤチップ層で大きく減衰し、地表面ではタイヤチップ層が深い位置にあるほど、また、その層厚が厚いほど小さくなっている。しかし、最下層にタイヤチップを配置した場合、タイヤチップの層厚が4m以上の場合にはその差は小さくなっている。図 (b)で、最大過剰間隙水圧比は、タイヤチップ層で著しく低下するばかりでなく、タイヤチップ層より上部の砂層でも低い値となっている。これは、タイヤチップ層での地震波の減衰が著しいためと考えられる。そのため、タイヤチップ層より下部に砂層がある場合では、全層砂とした場合SSSと同程度に値が大きくなっている。タイヤチップの層厚を2mとした場合SST2mでは間隙水圧比は0.2程度まで上昇しているが、最下層に4m、6mのタイヤチップ層を配置した場合は、全層タイヤチップとした場合TTTとほぼ同じ間隙水圧の分布形状を示すことが確認できる。一方、図 (c)の最大応答水平変位はタイヤチップ層において大きく増加している。これは、剛性の低いタイヤチ

ップ層でのみひずみが集中したためと考えられる。そのため、地表面での最大変位はタイヤチップ層が深い位置にあるほど、また、その層厚が厚いほど値が大きく現れている。

5 タイヤチップ含有率と地表面最大応答加速度および卓越周波数の関係

Fig. 11 に全層砂SSS、全層タイヤチップTTT、砂とタイヤチップを混合した場合および深層にタイヤチップを配置した場合における地表面の最大応答加速度および卓越周波数とタイヤチップ含有率との関係を示す。ここで、深層がタイヤチップの場合SSTの値はオンライン層全体においてタイヤチップの占める割合を示しており、層厚が2m、4m、6mの場合、それぞれ17%、33%、50%となっている。八戸波の最大加速度は500Galであるから、タイヤチップ含有率の増加と共に地表面最大応答加速度の値は小さくなり、特に最下層がタイヤチップの場合SSTでは著しく小さくなっている。このことから、最下層にタイヤチップを配置した場合は同量のタイヤチップを混合した場合よりも減震効果が強く発揮される結果となっている。全層砂とした場合は1Hz付近におけるスペクトルの増加が認められる。しかし、他の実験ケースでは卓越周波数は0.4Hz程度となっており、タイヤチップを利用することで長周期化し周波数帯域も狭まったことにより、入力波の特に高周波成分が除去され、振動全体が低減されたと考えられる。

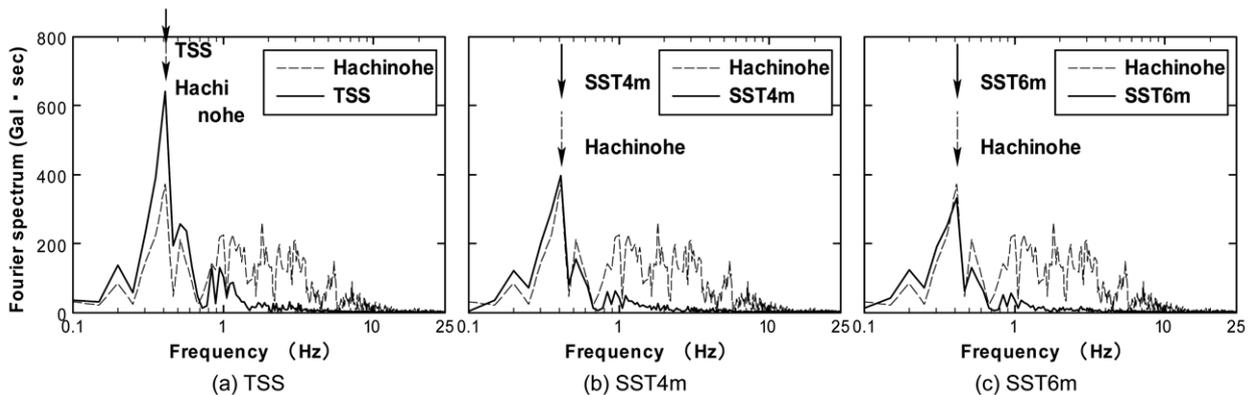


Fig. 9 Fourier spectrum of acceleration in ground surface.

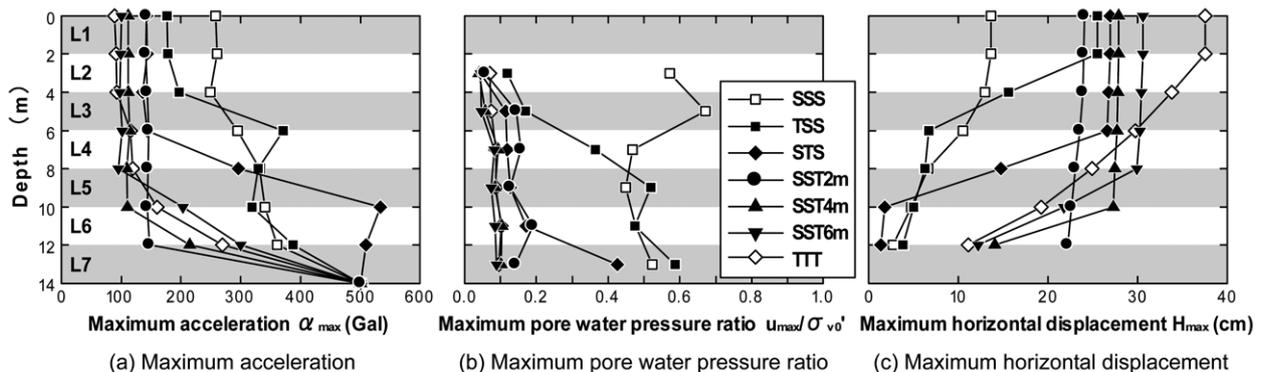
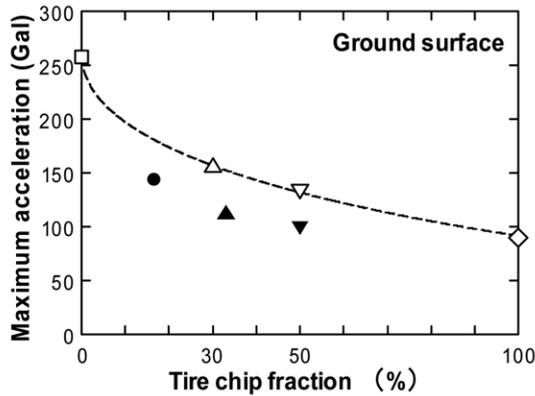
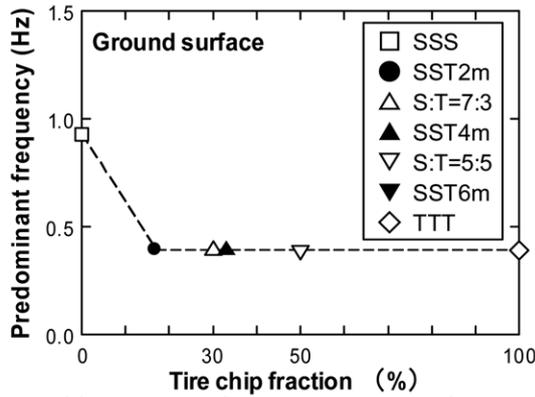


Fig. 10 Depth distribution of each parameter.



(a) Maximum acceleration in ground surface



(b) Predominant frequency in ground surface

Fig. 11 Relation between maximum acceleration and predominant frequency in ground surface, and tire chip content.

6 ま と め

本研究では、タイヤチップと砂との混合または互層地盤に対し、タイヤチップの混合率やタイヤチップ層の層序や層厚を変化させ、オンライン地震応答実験を行った。本研究で得られた知見から、タイヤチップを地盤材料として利用する場合に期待できる効果は以下の通りである。

(1) タイヤチップを砂と混合した場合でも、減震・免震効果が期待できる。

(2) タイヤチップを単体で層状に利用する場合、タイヤチップ層が深い位置にあるほど、また、その層厚が厚いほど効果は大きくなる。

(3) 同量のタイヤチップを用いる場合、混合するよりも最下層に層として配置する方がより大きな効果が期待できる。

以上の結果から、タイヤチップ層を単体で深い位置に厚く設置するほど地震に対して効果的であることが示された。その反面、タイヤチップ層の剛性が低いために、変形が大きい結果になっているが、これは、オンライン地震応答実験が1次元の条件で実施されるためであり、実地盤では、周囲にタイヤチップ以外の地盤が存在しており、変位はそれほど大きくなりませんと予想される。したがって、実地盤におけるタイヤチップのより効果的

な利用を検討するためには、2次元および3次元的な視点からの評価を実施していく必要があると考えられる。

参 考 文 献

- 1) K. Fukutake, S. Horiuchi, H. Matsuoka, S. Liu and H. Kawasaki, "Stable Geostructure using Recycled Tires and Properties of Improved Body using Tires with Granular Materials", Proceedings of the 5th Kankyoubankougaku Symposium, pp.189-194 (2003) The Japanese Geotechnical Society.
- 2) Y. Kikuchi, T. Nagatome and Y. Mitarai, "Failure and Permeability Properties of Cement Treated Clay with Tire Chips under Shear Deformation", Report of the Port and Airport Research Institute, Vol.45, No.2, pp.87-103 (2006).
- 3) H. Hazarika, E. Kohama, H. Suzuki and T. Sugano, "Enhancement of Earthquake Resistance of Structures using Tire Chips as Compressible Inclusion", Report of the Port and Airport Research Institute, Vol.45, No.1, pp.3-28 (2006).
- 4) Y. Mitarai, H. Kawai, T. Kishida, T. Nagatome, K. Yasuhara, S. Murakami, T. Sugano, H. Hazarika, Y. Kikuchi, N. Tatarazako, H. Takeichi and A. K. Karmokar, "Damping Capability of Impact Load by Used-Tire chips", Proceedings of the 41st Japan National Conference on Geotechnical Engineering, CD-ROM, pp.595-596 (2006) The Japanese Geotechnical Society.
- 5) Japan Society of Civil Engineers, "Guidance of FWD and Small FWD Operation Pavior Study Library 2", P.99 (2002) Maruzen Co. Ltd..
- 6) F. Kin, M. Hyodo, S. Yamada, M. Okamoto, S. Kawata and H. Hazarika, "Cyclic Shear Characteristics of Tire Chips and Sand Mixtures", Proceedings of the 42nd Japan National Conference on Geotechnical Engineering, CD-ROM, pp.501-502 (2007) The Japanese Geotechnical Society.
- 7) H. H. Tsang, "Seismic Isolation by Rubber-Soil Mixture for Developing Countries", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.37, pp.283-303 (2008).
- 8) S. Kusakabe, S. Morio and K. Arimoto, "Liquefaction Phenomenon of Sand Layers by Using On-Line Computer Test Control Method", Soils and Foundations, Vol.30, No.3, pp.174-184 (1990).
- 9) S. Kusakabe, S. Morio, T. Okabayashi, T. Fujii and M. Hyodo, "Development of a Simplified Simple Shear Apparatus and its Application to Various Liquefaction Tests", Journal of Geotechnical Engineering, Vol.617, No.III-46, pp.299-304 (1999).
- 10) A. Yamaguchi, M. Kazama and S. Kusakabe, "On-Line Test of the Seismic Response at Kobe Artificial Island", Journal of Geotechnical Engineering, Vol.701, No.58, pp.181-195 (2002).