

# タイヤチップおよびその砂との混合土の 動的変形特性および地震応答特性

金子 崇<sup>1</sup>・兵動 正幸<sup>2</sup>・中田 幸男<sup>3</sup>・吉本 憲正<sup>4</sup>・Hemanta HAZARIKA<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 港湾空港技術研究所 地盤研究領域 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

E-mail: kaneko-t@pari.go.jp

<sup>2</sup>正会員 山口大学大学院教授 理工学研究科環境共生系専攻 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

E-mail: hyodo@yamaguchi-u.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 山口大学大学院教授 理工学研究科環境共生系専攻 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

E-mail: nakata@yamaguchi-u.ac.jp

<sup>4</sup>正会員 山口大学大学院助教 理工学研究科環境共生系専攻 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

E-mail: nyoshi@yamaguchi-u.ac.jp

<sup>5</sup>正会員 九州大学教授 工学部地球環境工学科 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744番地)

E-mail: hazarika@civil.kyushu-u.ac.jp

本研究では、砂とタイヤチップを様々な割合で混合した土に対し、中空ねじりせん断試験機による動的変形試験を行った。その結果、タイヤチップを混合した場合、せん断弾性係数は非常に小さくなるが、大きなひずみ域においても弾性的性質を示し、履歴減衰率は微小ひずみ域においても高い値を示すことが明らかとなった。また、その結果を用いて、タイヤチップを地盤材料として用いた地盤を想定し、全応力解析であるSHAKEと有効応力解析であるオンライン地震応答解析を行った結果、両解析において、タイヤチップの存在による応答加速度波形の減衰・長周期化の傾向や最大応答加速度・最大応答変位の深度分布の形状が比較的良好に対応することが確認された。

**Key Words** : *tire chip, recycle, dynamic deformation, hollow cylindrical torsional shear test, seismic response analysis, pseudo-dynamic test*

## 1. はじめに

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。

アメリカでは1990年代より廃タイヤの地盤材料としての利用に関する研究が進められており、廃タイヤのサイズや処理の方法によるASTM規格<sup>1)</sup>が定められている。

具体的な例としては、アスファルト舗装への適用<sup>2~4)</sup>や擁壁の軽量裏込め材への利用<sup>5~8)</sup>などが挙げられる。日本における廃タイヤの地盤材料としての利用に関する研究では、菊池ら<sup>9)</sup>が、固化処理土にタイヤチップを混合して脆性的破壊を余儀なくされていた固化処理土に大きな靱性を賦与することに成功した。また、ハザリカら<sup>10)</sup>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、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から、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。

タイヤチップ混合砂の力学特性について、圧縮特性や透水性、せん断特性、ヤング率やポアソン比等、数多くの研究<sup>8), 11)~13)</sup>が行われている。Zheng-Yi & Sutter<sup>14)</sup>は、ねじり共振法試験による実験を行い、微小ひずみ域における動的変形特性について明らかとしている。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。山田ら<sup>15)</sup>は種々の割合で混合したタイヤチップ混合砂に対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。

このようなタイヤチップの液状化抑止効果と高いダンピング性能、振動吸収性能に着目することで、地震時の飽和砂地盤の液状化防止と免震効果が期待できる。Tsang<sup>16)</sup>は、基礎周辺の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鉛直加速度を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。さらに、筆者ら<sup>17)</sup>は、タイヤチップと砂とを混合した地盤またはタイヤチップと砂の互層地盤を想定し、要素試験と応答計算を併用したオンライン地震応答解析を行い、応答加速度低減に対するタイヤチップと砂のより適切な混合率および配置について検討を行った。また、御代田ら<sup>18)</sup>は著者らのタイヤチップを用いたオンライン地震応答解析の結果<sup>17)</sup>を参考に、裏込め地盤の下部にタイヤチップを敷設した岸壁を想定して1g場振動台模型実験を行い、地震時の地盤の変形および液状化が低減することを確認した。

本研究では、まず中空ねじりせん断試験機を用いることにより、より広い範囲のひずみ域におけるタイヤチップ混合砂の動的変形特性を調べた。求めた動的変形特性を用いて、一次元等価線形地震応答解析SHAKEによる解析を行い、オンライン地震応答解析との比較を行うことで、タイヤチップを利用することによる、減震効果、免震効果について検討を行った。SHAKEは全応力解析であるのに対し、オンライン地震応答解析は、間隙水圧の発生を考慮できる有効応力解析であり、両者の結果が異なることは当然であるが、いずれも地盤のせん断弾性係数のひずみ依存性を考慮できることから、本研究ではこれら2つの方法で、タイヤチップ利用の効果を検討した。

## 2. 実験に用いた試料

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を用い、タイヤチップ単体、相馬珪砂単体、タイヤチップと相馬珪砂の混合砂を対象に実験を行った。各試料の物理的性質を表-1に示す。タイヤチップ混合砂は体積

表-1 試料の物理的性質

試料	Gs	e <sub>max</sub>	e <sub>min</sub>	d <sub>50</sub> (mm)	Uc
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

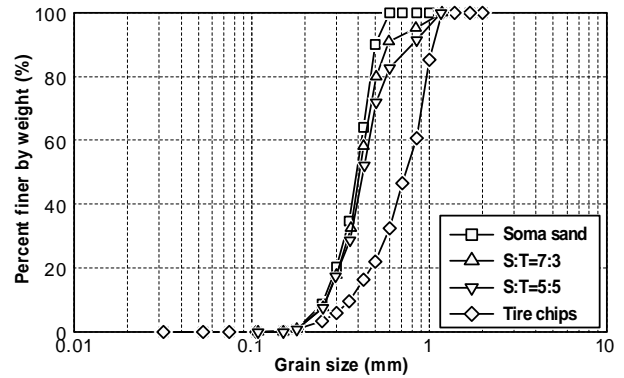


図-1 粒径加積曲線

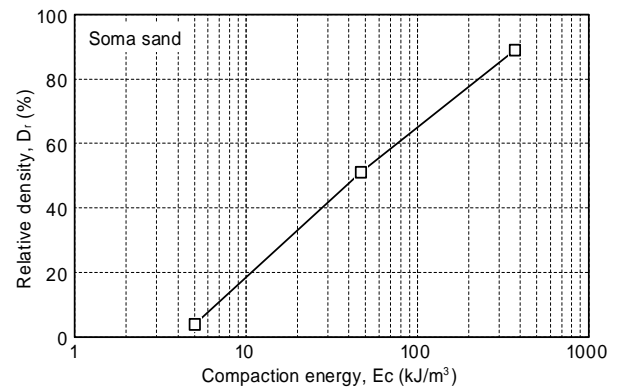


図-2 相対密度と突固めエネルギーの関係

比で相馬珪砂：タイヤチップ=7：3，5：5となるように混合して作製した。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。図-1に粒径加積曲線を示すが、これらの配合割合によるタイヤチップ混合砂の粒度分布は相馬珪砂のそれとさほどの違いは見られない。これはタイヤチップの単位体積質量が相馬珪砂に比べ小さいことによる。

## 3. 動的変形試験

### (1) 供試体および実験条件

供試体は所定の初期含水比のもと湿潤突固め法によって作製した。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10%となるように水を加え、均一になるように十分にかき混ぜた。次に、ペDESTALにゴムスリーブを装着し、高さ10cm、外径10cm、

内径6cmの中空円筒モールドに試料を5等分に投入し、次式の突固めエネルギー $E_C$ が所定の大きさとなるよう制御して作製した。

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

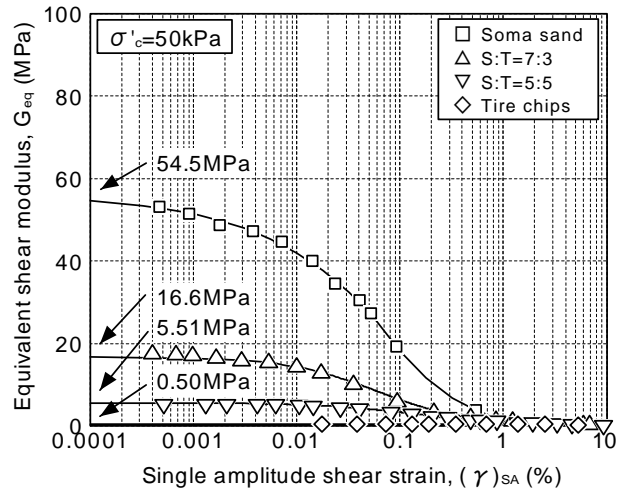
ここに、 $W_R$ : ランマー重量、 $H$ : 落下高さ、 $N_L$ : 層数、 $N_B$ : 1層毎の突固め回数、 $V$ : 供試体の体積である。

図-2に相対密度と突固めエネルギーの関係を示す。本研究において設定した突固めエネルギーは、相馬珪砂単体の供試体の相対密度が50%となるものとした。作製した供試体に対し、二酸化炭素注入後脱気水の通水を行い、いずれの方法で作製した供試体も間隙圧係数 $b$ 値が0.95以上であることを確認した。動的変形試験は、地盤工学会基準「土の変形特性を求めめるための中空円筒供試体による繰返しねじりせん断試験方法」(JIS 0543-2000)に定められる方法で行った。すなわち、各試料に対し有効拘束圧 $\sigma'_c=50, 100, 150$ kPaの3通りとなるよう等方圧密を行い、それぞれの供試体に非排水条件で、各せん断ひずみステップ毎に周波数 $f=0.1$ Hzの正弦波形の繰返し荷重を11回与えて行った。各ステップの繰返しせん断後は、排水状態にして過剰間隙水圧を消散させた。

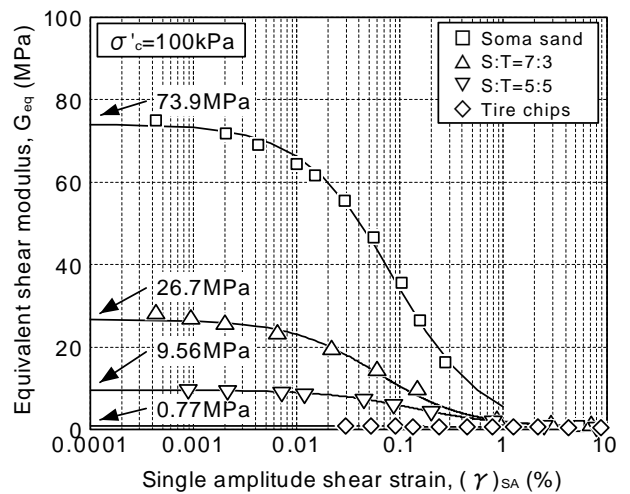
(2) 試験結果

相馬珪砂、タイヤチップ、相馬珪砂とタイヤチップの混合砂の等価せん断弾性係数 $G_{eq}$ と片振幅せん断ひずみ $(\gamma)_{SA}$ の関係を図-3(a)-(c)に、それらの履歴減衰率 $h$ と片振幅せん断ひずみ $(\gamma)_{SA}$ の関係を図-4(a)-(c)に、それぞれ有効拘束圧毎に示す。また、図-3には、それぞれの曲線から $(\gamma)_{SA}=0.0001\%$ に対する $G_{eq}$ を読み取った値を初期せん断弾性係数 $G_0$ として示している。

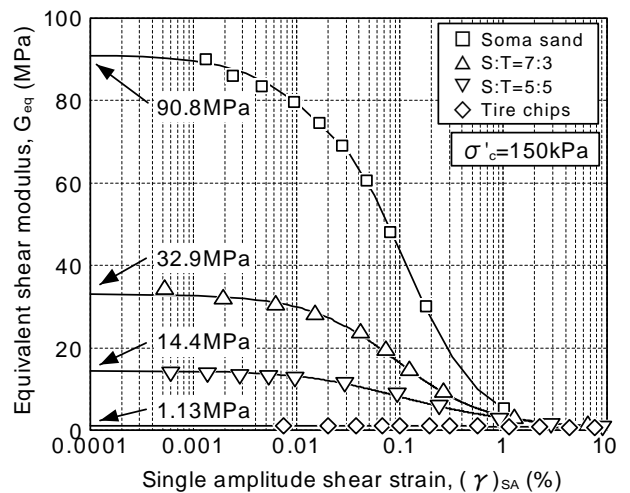
図-3より、タイヤチップの初期せん断弾性係数は非常に小さく、珪砂の約0.01倍の値を示している。タイヤチップ単体においては、剛性が極めて低いために0.01%以下のひずみレベルの試験が不可能であったが、0.1%のひずみまで、せん断弾性係数がほぼ変わらなかったことから、微小ひずみ域においても同じせん断弾性係数であったと判断した。また、珪砂にタイヤチップを混合すると初期せん断弾性係数は著しく低下し、タイヤチップを30%混合した場合で珪砂単体の約0.3倍、50%混合した場合で約0.1倍の値となっている。図-4より履歴減衰率は、タイヤチップにおいては低いひずみ領域においても高い値を示し、混合砂においてもタイヤチップの割合が高くなるほど低いひずみ領域で高い履歴減衰率が得られている。一方、相馬珪砂および混合砂においては、片振幅せん断ひずみ $(\gamma)_{SA}=0.01\%$ 程から履歴減衰率が急激に増加を示すが、これは有効応力の低下に伴う剛性の低下によ



(a)  $\sigma'_c=50$ kPa



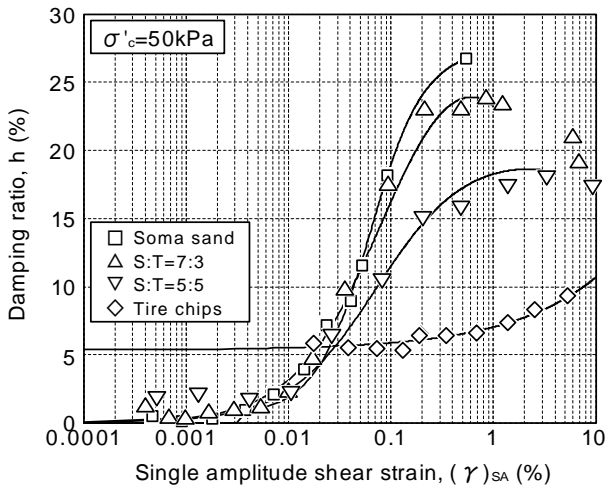
(b)  $\sigma'_c=100$ kPa



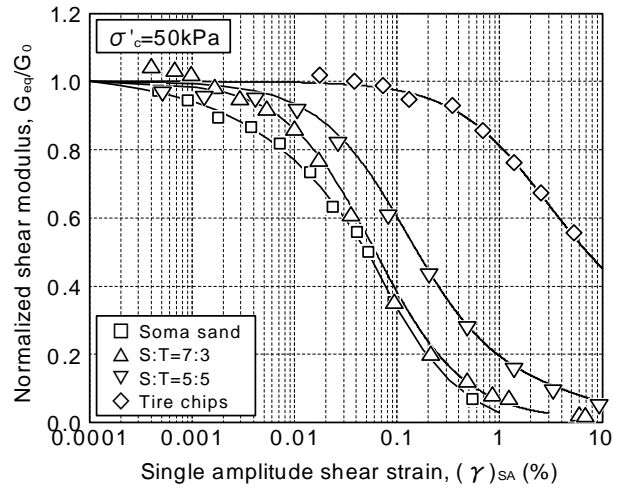
(c)  $\sigma'_c=150$ kPa

図-3 等価せん断弾性係数と片振幅せん断ひずみの関係

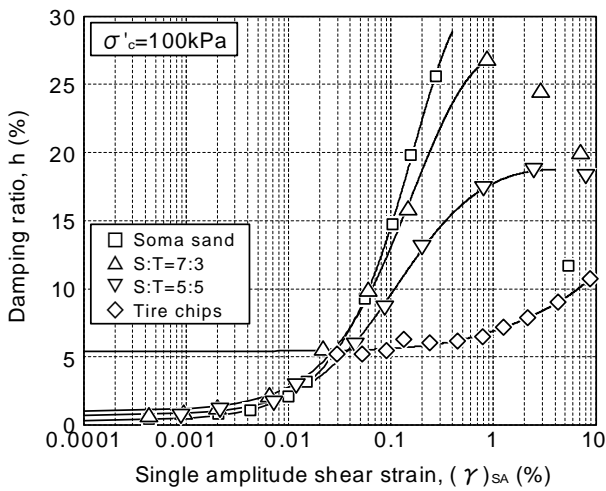
る履歴ループの拡大によるものと考えられる。図-5に等価せん断弾性係数 $G_{eq}$ を初期せん断弾性係数 $G_0$ で正規化した $G_{eq}/G_0$ と片振幅せん断ひずみ $(\gamma)_{SA}$ の関係を有効拘束圧毎に示す。タイヤチップは、大ひずみ域に至ってもせ



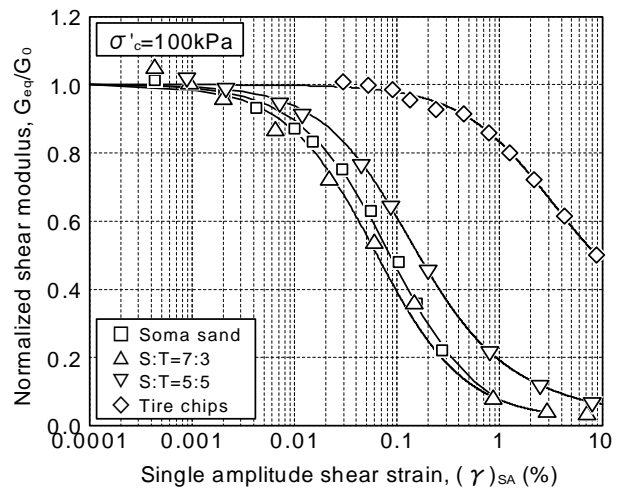
(a)  $\sigma'_c=50\text{kPa}$



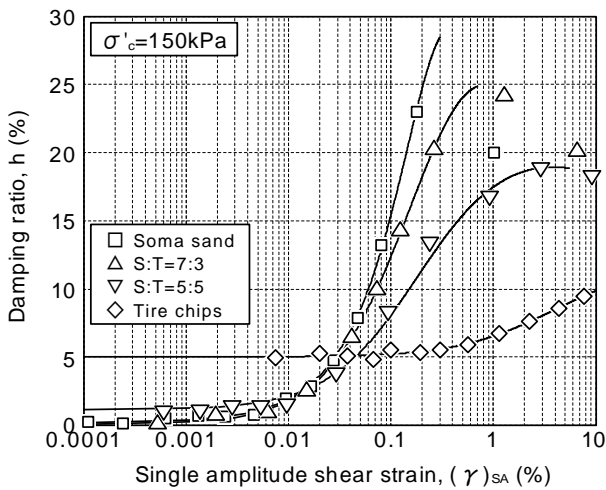
(a)  $\sigma'_c=50\text{kPa}$



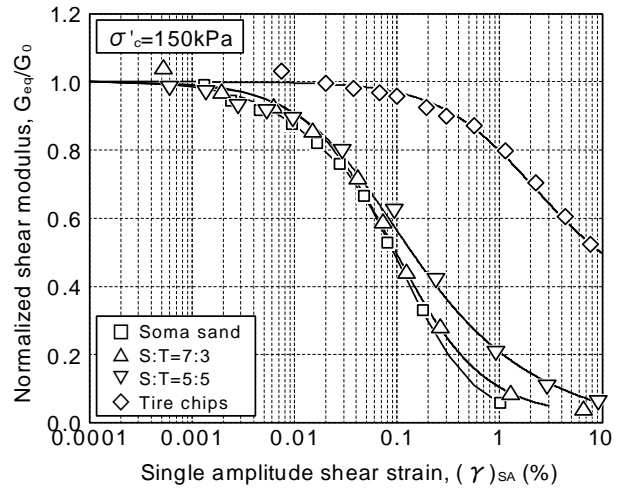
(b)  $\sigma'_c=100\text{kPa}$



(b)  $\sigma'_c=100\text{kPa}$



(c)  $\sigma'_c=150\text{kPa}$



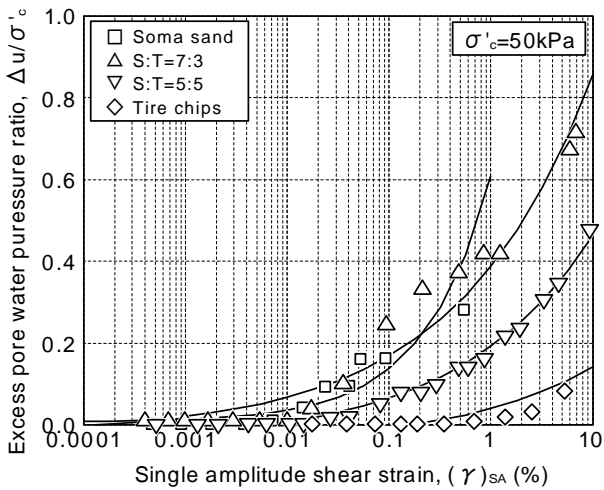
(c)  $\sigma'_c=150\text{kPa}$

図4 履歴減衰率と片振幅せん断ひずみの関係

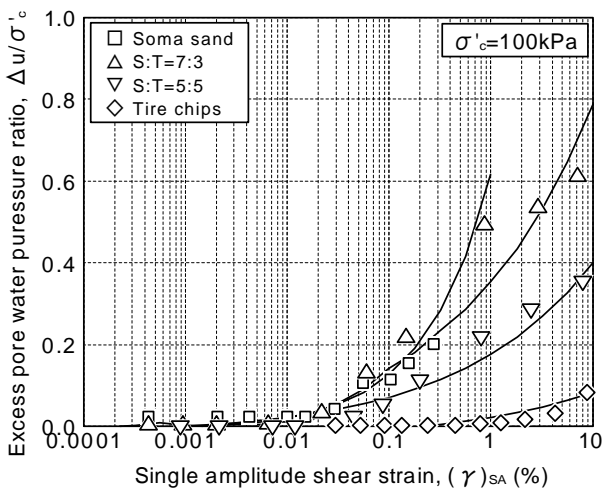
図5  $G_{eq}/G_0$ と片振幅せん断ひずみの関係

せん断弾性係数が低下せず、 $(\gamma)_{SA}=10\%$ でもせん断弾性係数は半分程度までしか低下していないなど、顕著な弾性的性質を示している。混合砂もタイヤチップの割合が高くなるほど弾性域は増加し、等価せん断弾性係数の低下

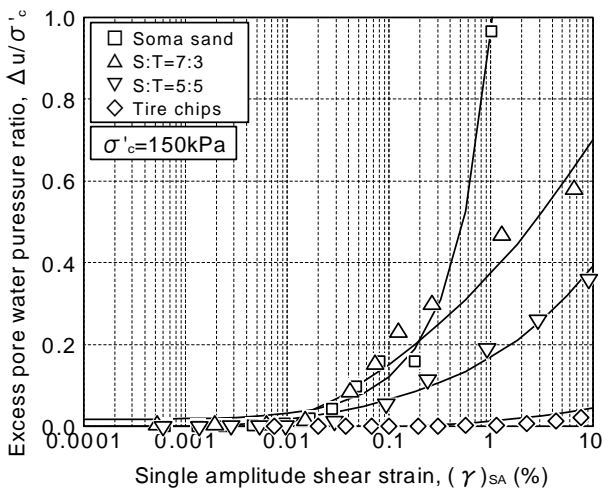
も抑えられている。図-6(a)-(c)に、正弦波10波目開始時における過剰間隙水圧を有効拘束圧で正規化した値と片振幅せん断ひずみ $(\gamma)_{SA}$ の関係を有効拘束圧毎に示す。珪砂にタイヤチップを混合した場合、タイヤチップの混



(a)  $\sigma'_c=50\text{kPa}$



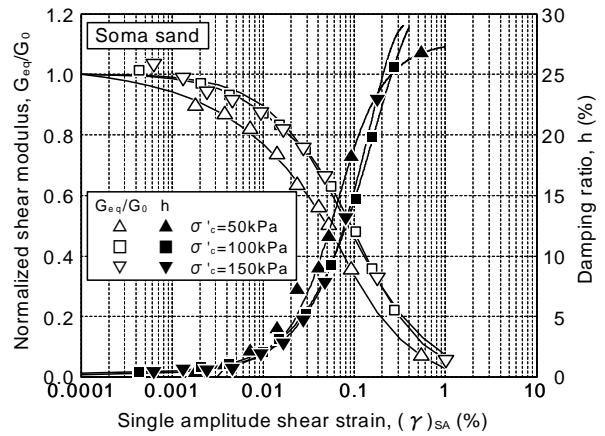
(b)  $\sigma'_c=100\text{kPa}$



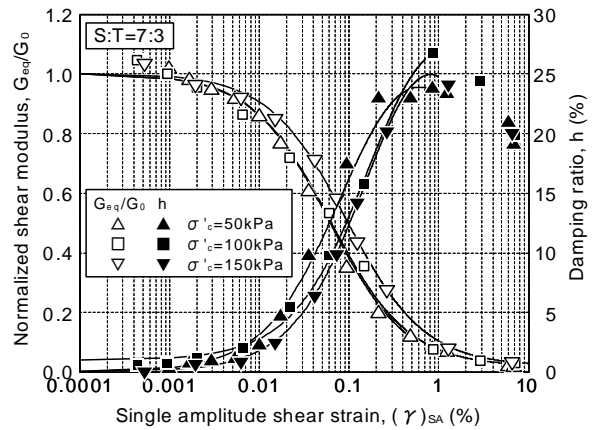
(c)  $\sigma'_c=150\text{kPa}$

図6 過剰間隙水圧比と片振幅せん断ひずみの関係

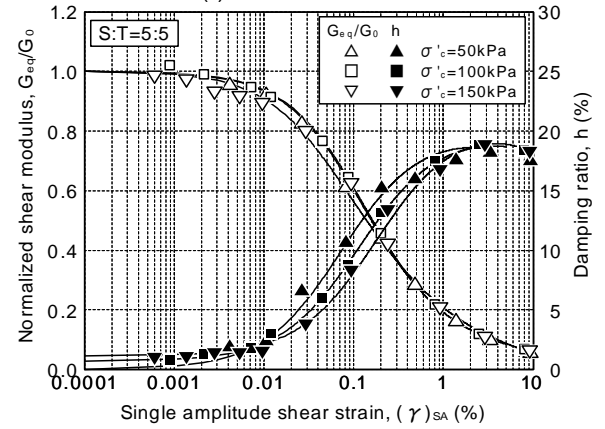
合割合が高くなるほど間隙水圧が上昇しはじめるひずみが大きくなり、大ひずみ域における間隙水圧も抑えられている。このような液状化特性の違いによって混合砂やタイヤチップ単体の場合は、せん断ひずみ振幅の増加に



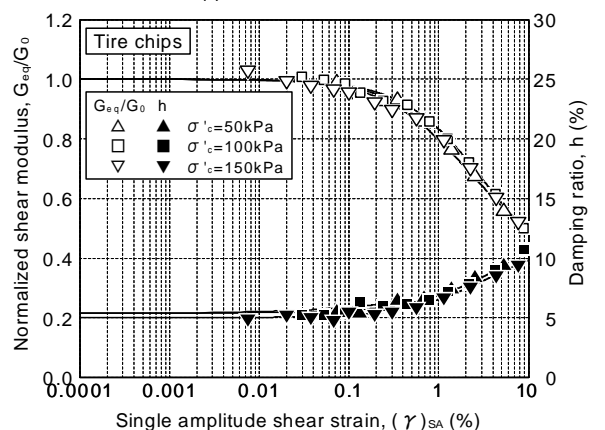
(a) 相馬珪砂



(b) TC30%混合



(c) TC50%混合



(d) TC

図7 動的変形特性の拘束圧依存性

伴うせん断弾性係数の低下傾向および履歴減衰率の増加傾向は緩やかとなっていると推察される。

図-7に正規化した等価せん断弾性係数 $G_{eq}/G_0$ と片振幅せん断ひずみ $(\gamma)_{SA}$ の関係をタイヤチップの混合率毎に示す。既往の研究においてきれいな砂の場合、有効拘束圧が $G_{eq}/G_0 \sim (\gamma)_{SA}$ および $h \sim (\gamma)_{SA}$ 関係に影響を与えること<sup>19)</sup>が明らかとなっている。本研究では、図-7(a)において、相馬珪砂の $G_{eq}/G_0 \sim (\gamma)_{SA}$ および $h \sim (\gamma)_{SA}$ 関係は有効拘束圧の影響を受けていることが確認できるが、図-7(b), (c)のようにタイヤチップを混合すると、その影響は小さくなり、図-7(d)に示すようにタイヤチップ単体の場合、有効拘束圧は $G_{eq}/G_0 \sim (\gamma)_{SA}$ および $h \sim (\gamma)_{SA}$ 関係に影響を与えないことが確認される。

#### 4. 地震応答解析

##### (1) SHAKEによる地震応答解析

SHAKEはSchnabelら<sup>20)</sup>により開発された等価線形化手法を用いた一次元地震応答全応力解析プログラムである。SHAKEによる解析に必要なパラメータは層厚、湿潤単位体積重量 $\gamma$ 、 $G_{eq}/G_0 \sim \gamma$ 及び $h \sim \gamma$ 曲線、初期せん断弾性率 $G_0$ 及び初期減衰率 $h_0$ 、有効ひずみ算定のための係数である。層厚、 $\gamma$ は後述するオンライン地震応答解析と同様とし、 $G_{eq}/G_0 \sim \gamma$ 及び $h \sim \gamma$ 曲線は図-7に示した中空ねじりせん断試験による結果を用いた。 $G_0$ は図-8に示す初期せん断弾性係数と有効拘束圧の関係を用いて、以下に示す式より拘束圧の影響を考慮した値を求めた。

$$G_0 = A \cdot (\sigma'_c)^n \quad (2)$$

また、初期減衰率 $h_0=5\%$ 、有効ひずみ算定のための係数は0.65とした。

##### (2) オンライン地震応答解析

オンライン地震応答解析の概要<sup>21)</sup>を図-9に示す。オンライン地震応答解析とは、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。オンライン地震応答解析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、図-10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

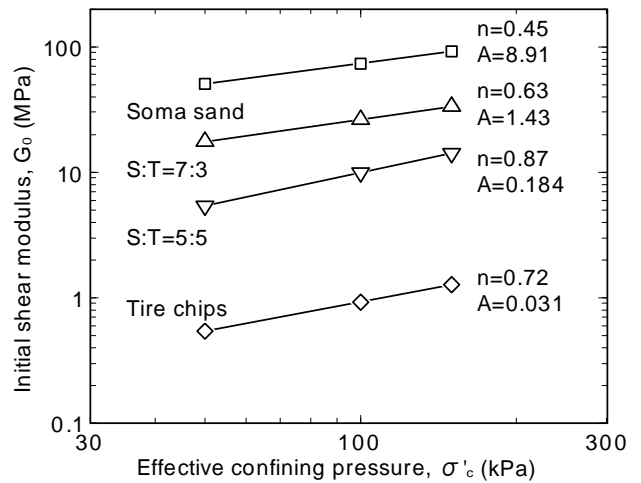


図-8 初期せん断弾性係数と有効拘束圧の関係

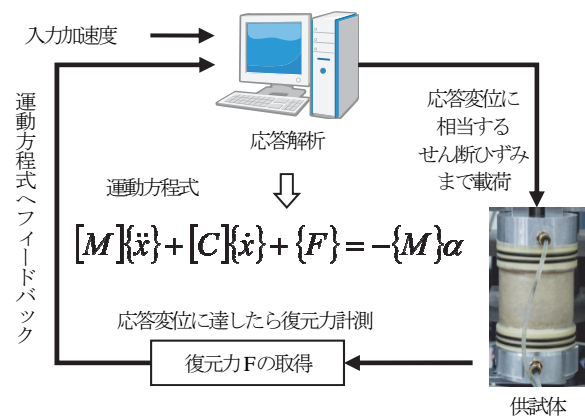


図-9 オンライン地震応答実験の概要

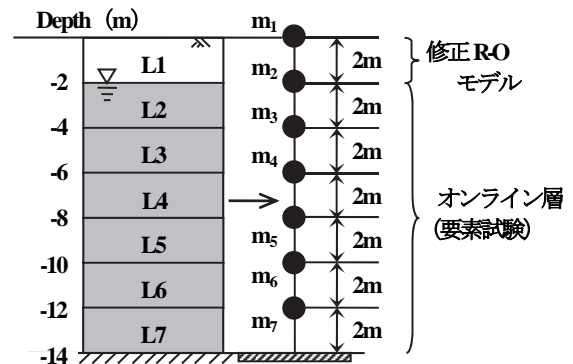


図-10 地盤のモデル化

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。本システムの要素実験部分は、日下部ら<sup>22)</sup>により開発された簡易単純せん断試験機を用いている。

表-2 実験ケース

Layer	Test Case						
	□ SSS	△ S:T=7:3	▽ S:T=5:5	◇ TTT	● SST2m	▲ SST4m	▼ SST6m
L1	不飽和解析層 ( $\gamma_s=17.64\text{kN/m}^3$ $G_0=52\text{MPa}$ $\tau_f=12\text{kPa}$ $\alpha=2.31$ $\beta=2.21$ )						
L2	相馬珪砂	混合砂 (T30%)	混合砂 (T50%)	タイヤチップ	相馬珪砂	相馬珪砂	相馬珪砂
L3	相馬珪砂	混合砂 (T30%)	混合砂 (T50%)	タイヤチップ	相馬珪砂	相馬珪砂	相馬珪砂
L4	相馬珪砂	混合砂 (T30%)	混合砂 (T50%)	タイヤチップ	相馬珪砂	相馬珪砂	相馬珪砂
L5	相馬珪砂	混合砂 (T30%)	混合砂 (T50%)	タイヤチップ	相馬珪砂	相馬珪砂	タイヤチップ
L6	相馬珪砂	混合砂 (T30%)	混合砂 (T50%)	タイヤチップ	相馬珪砂	タイヤチップ	タイヤチップ
L7	相馬珪砂	混合砂 (T30%)	混合砂 (T50%)	タイヤチップ	タイヤチップ	タイヤチップ	タイヤチップ

オンライン地震応答解析には次の運動方程式を用いた。

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + F = -MA \quad (3)$$

$$C = \alpha M + \beta K \quad (4)$$

ここに  $M$ : 質量マトリックス,  $C$ : 減衰マトリックス,  $F$ : 復元力ベクトル,  $A$ : 入力加速度,  $K$ : 剛性マトリックス,  $\alpha, \beta$ : レイリー減衰の係数である。レイリー減衰の係数はそれぞれ1次及び2次の固有振動数  $\omega_1 \cdot \omega_2$  と減衰定数  $h_1 \cdot h_2$  から次式で求められる<sup>23)</sup>。

$$\alpha = 2\omega_1 \cdot \omega_2 \cdot \frac{h_1 \cdot \omega_2 - h_2 \cdot \omega_1}{(\omega_2^2 - \omega_1^2)} \quad (5)$$

$$\beta = 2 \frac{h_2 \cdot \omega_2 - h_1 \cdot \omega_1}{(\omega_2^2 - \omega_1^2)} \quad (6)$$

ここでは、対象とする多層地盤を等価な均質一様地盤に置換し、「1/4波長則」に基づいて次式により1次・2次の固有振動数  $\omega$  を求め<sup>24)</sup>、土の粘性減衰定数  $h$  については厳密に決定する方法がないため、ここでは1次・2次ともに0.05と仮定した。

$$\omega_1 = 2\pi \frac{1}{T_1} = 2\pi \frac{\sum V_{si} \cdot H_i}{4 \sum H_i \cdot \sum H_i} \quad (7)$$

$$\omega_2 = 2\pi \frac{1}{T_2} = 2\pi \frac{1}{T_1/3} = 3\omega_1 \quad (8)$$

$$h_1 = h_2 = 0.05 \quad (9)$$

ここに  $T_1 \cdot T_2$ : 1次・2次の固有周期,  $V_s$ : 多層地盤における各層のせん断弾性波速度,  $H_i$ : 各層の層厚である。

数値積分法には第1ステップでは線形加速度法を用い、

第2ステップ以降では衝撃加速度法を採用した<sup>25)</sup>。ステップにより積分法を変えた理由は、第1ステップでは衝撃加速度法に必要なそれ以前の変位やせん断応力が未知であるためであり、第2ステップ以降では線形加速度法の接線剛性の精度の信頼性が低いためである。積分時間間隔は0.02秒とした。

供試体は動的変形試験と同様に、初期含水比10%のもとの湿潤突固め法によって作製した。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10%となるように水を加え、均一になるように十分に混ぜた。次に、ペDESTAL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、式(1)で表される突固めエネルギー  $E_c$  を制御して作製し、相馬珪砂の供試体において相対密度が50%となる条件を選択した。

### (3) 解析条件

地震応答解析は、表-2に示すようにオンライン地震応答解析において要素試験を行う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。表中の実験ケース名はL2~L7層における土質を表しており、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。不飽和解析層は修正R-Oモデル<sup>26)</sup>を用い、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<sup>27)</sup>を基に表-2に示すように決定した。また、基盤は剛基盤とし、入力波には加速度の最大値を500Galに調整した八戸波を用いた。

## 5. 砂・タイヤチップ混合地盤の応答

本章では、砂とタイヤチップの混合地盤に対する地震応答について検討した。タイヤチップの混合率は表-2に示すように0%、30%、50%、100%とし、実験ケースSSS, S:T=7:3, S:T=5:5, TTTについて比較を行った。

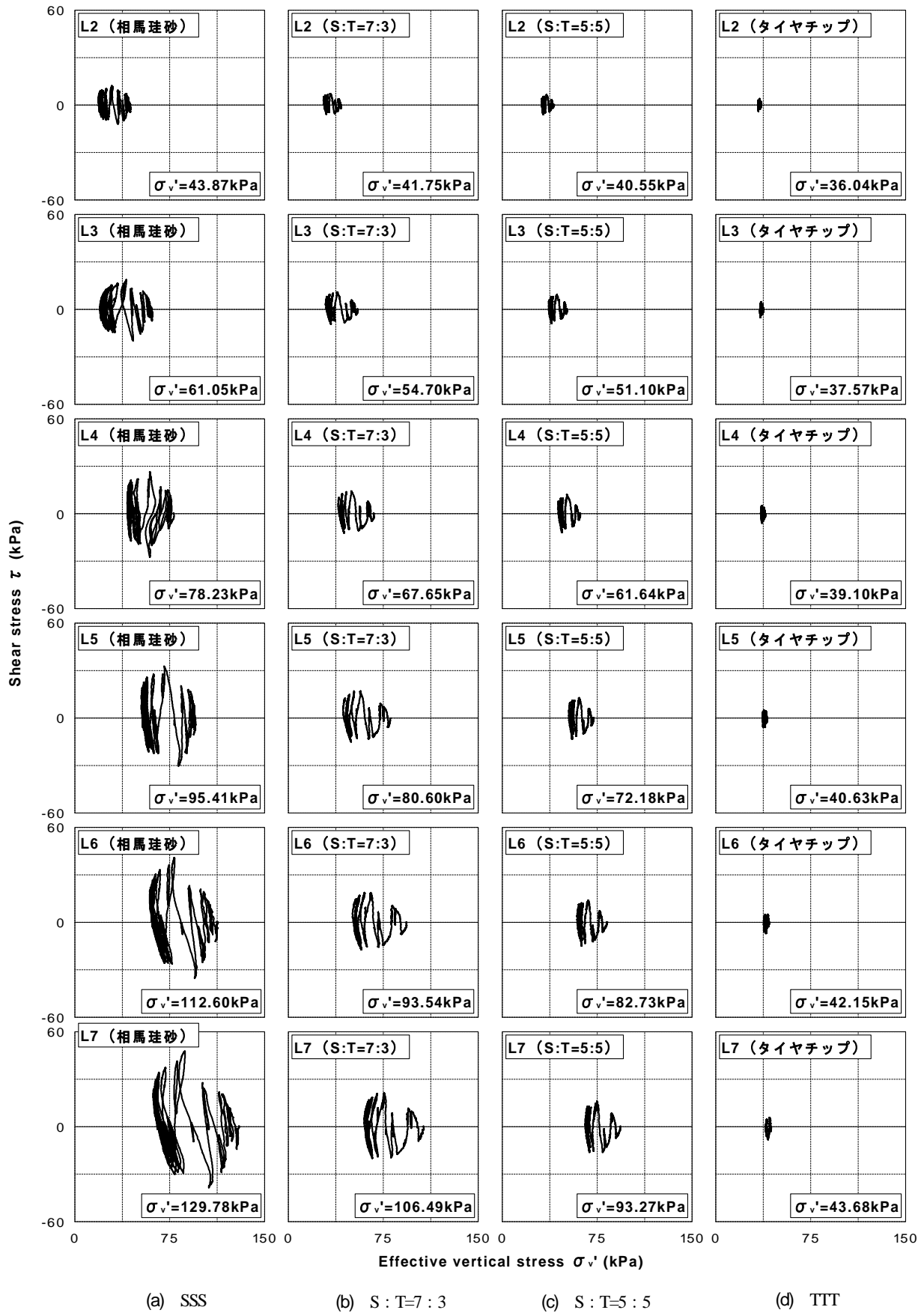


図-11 有効応力経路



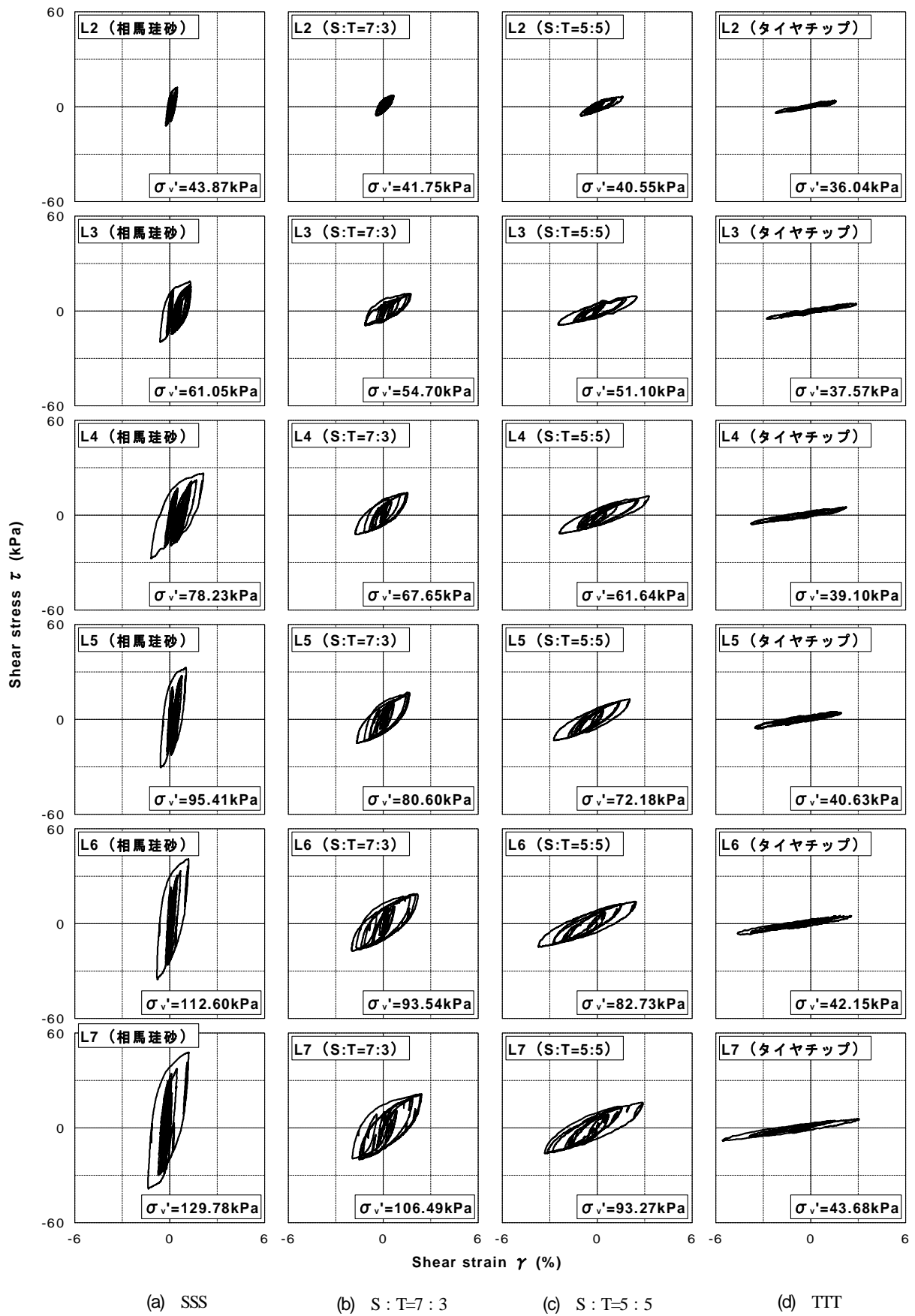


図-12 応力 - ひずみ関係

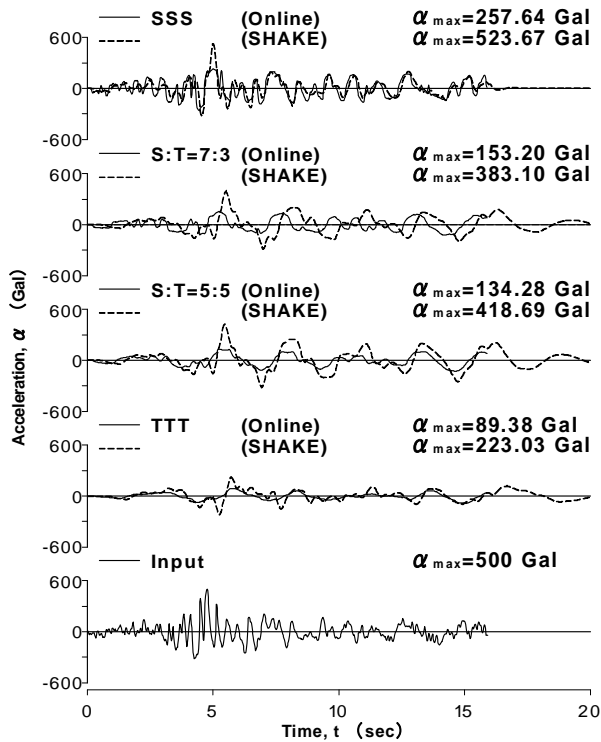


図-13 加速度時刻歴

(1) 有効応力経路およびせん断応力 - せん断ひずみ関係

オンライン地震応答解析では、地震応答解析と同時に要素試験を行う。図-11に各実験ケースにおけるL2～L7層の有効応力経路を示す。図より、全層砂とした場合SSSでは、いずれの層においても地震動が主要動に差し掛かった際の有効応力の低下が大きくなり、特にL3層では過剰間隙水圧比が0.67まで上昇している。混合砂の場合、全層砂とした場合SSSと比較して地震動初期の有効応力の低下が大きい、その後は漸減するのみで、特にタイヤチップを50%混合した場合S:T=5:5では、有効応力の低下が抑制されており、過剰間隙水圧比は全ての層で0.3程度となっている。また、全層タイヤチップとした場合TTTでは有効応力の低下はほとんど起きておらず、過剰間隙水圧比は0.1程度となっている。

図-12に同一層のせん断応力-ひずみ関係を示す。図より、タイヤチップの混合率の増加に伴い、最初から剛性が低い、扁平な応力ひずみ曲線ループに変わる様子が観察される。

(2) 加速度応答時刻歴

図-13に地表面における応答加速度と入力波である八戸波の加速度時刻歴を示す。地表面における応答加速度において、破線はSHAKEによる解析結果、実線はオンライン地震応答解析の結果を示す。

SHAKEによる解析、オンライン地震応答解析ともに、全層砂の場合SSSで応答加速度が最も大きく、タイヤチ

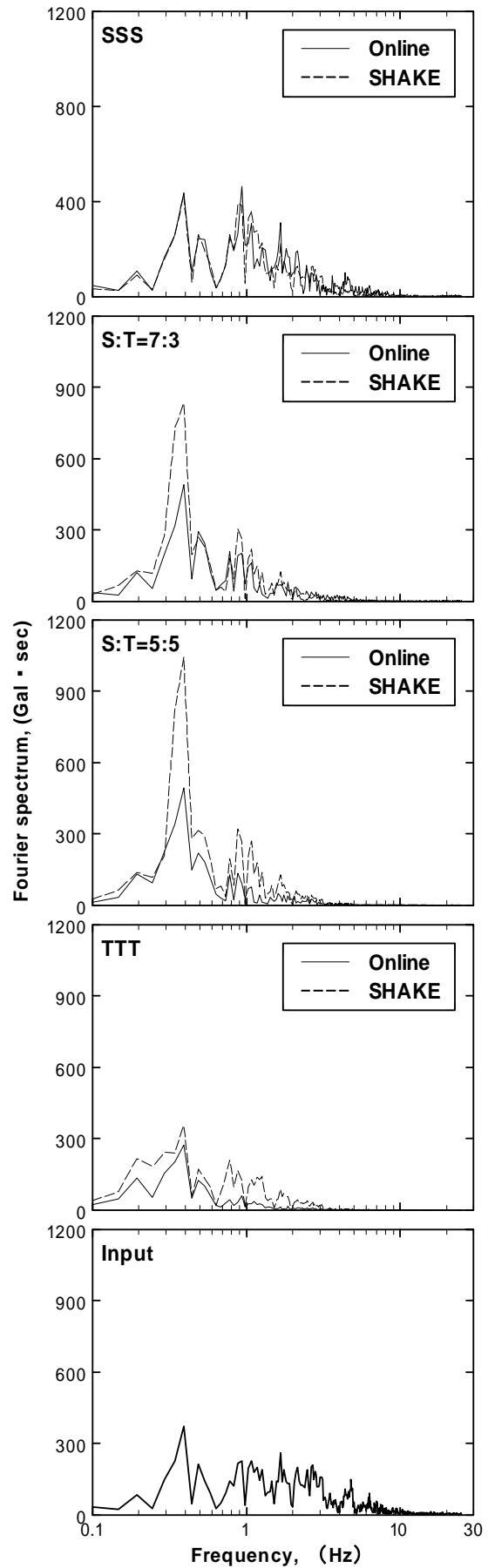


図-14 加速度フーリエスペクトル

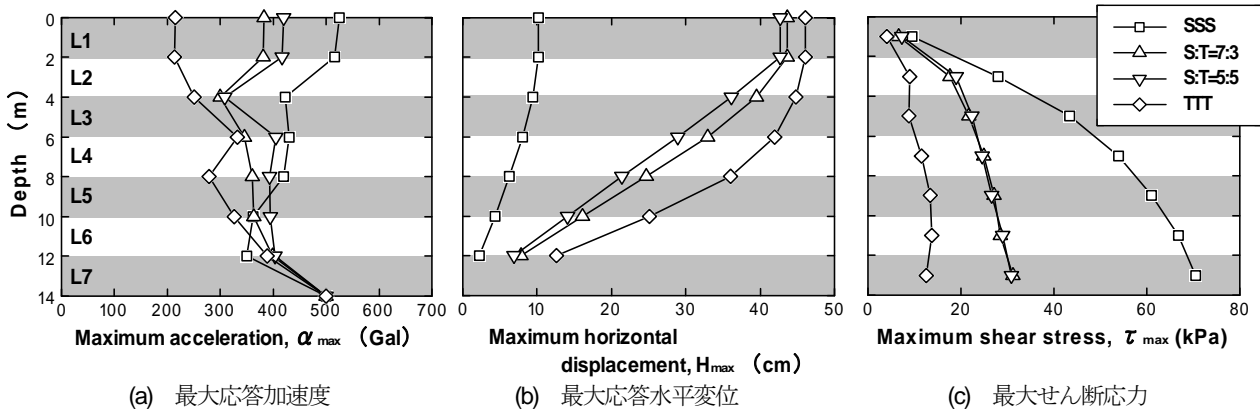


図-15 SHAKEによる解析結果

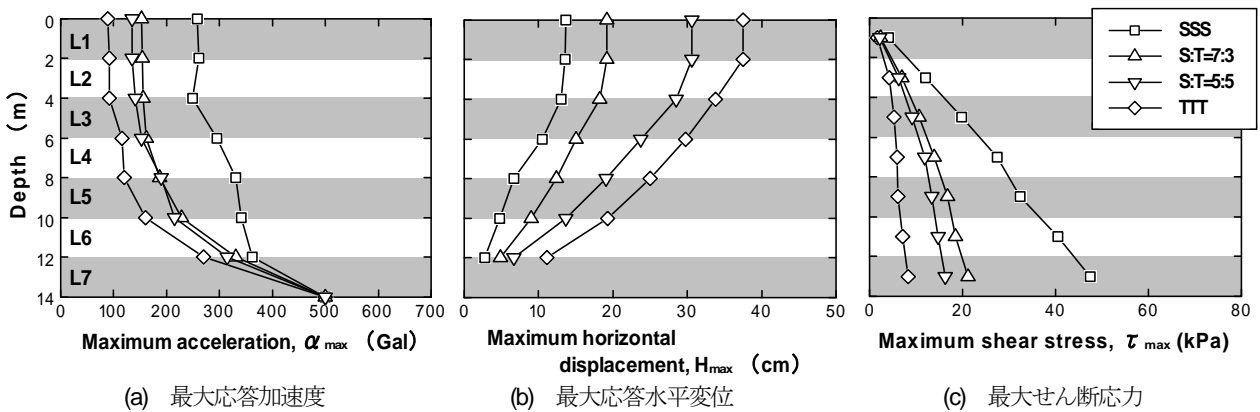


図-16 オンライン地震応答実験

ップを混合することで地震波が減衰・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剛性が大きく低下したため、入力波の主たる周波数成分や低周波成分の波動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より大きく低下するため、その効果を強く発揮し、全層タイヤチップの場合TTTでは地表面における応答加速度は最も低下している。

SHAKEによる解析とオンライン地震応答解析を比較すると、応答値に約2倍の差があるが、応答加速度波形の長周期化の傾向に関しては良い一致が見られる。

### (3) 地表面応答加速度のフーリエスペクトル

図-14に地表面での応答加速度のフーリエスペクトルと入力波である八戸波の加速度フーリエスペクトルを示す。地表面における応答加速度のフーリエスペクトルにおいて、破線はSHAKEによる解析結果、実線はオンライン地震応答解析の結果を示す。応答値に大きな差があるが、SHAKEによる解析もオンライン地震応答解析も、全層砂の場合SSSに入力波に比べて1Hz付近での振幅の増加がみられる点、タイヤチップを混合することで1Hz付近での振幅が減少し、地震波が長周期化している点が一貫している。また、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、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ている。これらの結果から、タイヤチップの存在により地盤の固有周期が長周期化し、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。

### (4) 応答結果の深度分布

SHAKEおよびオンライン地震応答解析からえられた最大応答加速度・最大応答水平変位・最大せん断応力の深度分布を図-15、図-16に示す。いずれも、図(a)の最大応答加速度はタイヤチップを混合することで著しく低下していることが確認できる。一方、図(b)の最大応答水平変位は、タイヤチップを混合した場合に混合率が増えるほど剛性が低下するため値は大きくなる傾向にある。すなわち、タイヤチップを利用することで、変位は大きくなる。この点では一見、埋設管等の地中構造物への影響の不安がある。しかし、これはオンライン地震応答実験が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らないものと予想される。また、図(c)の最大せん断応力は、タイヤチップを利用すること

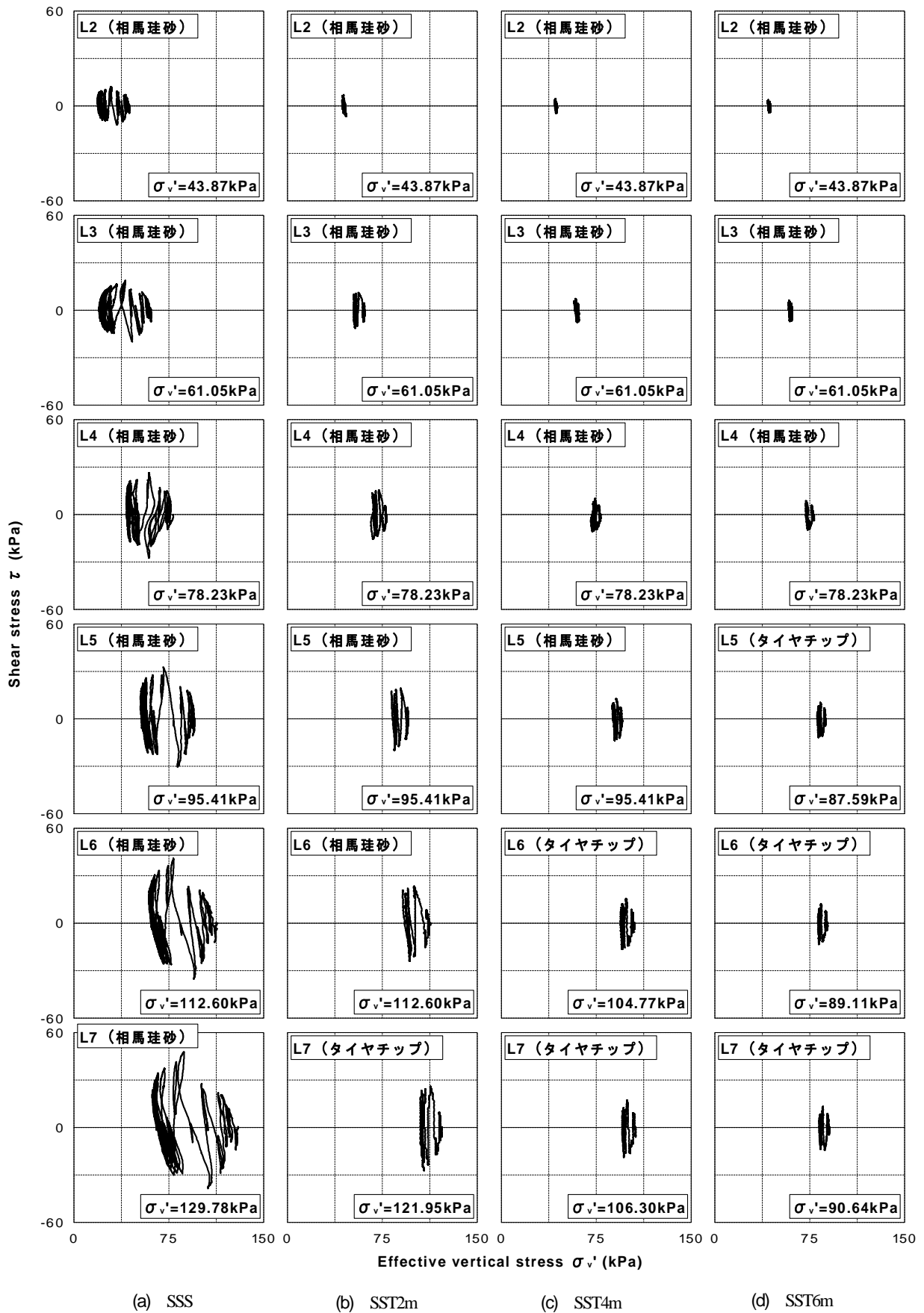


図-17 有効応力経路

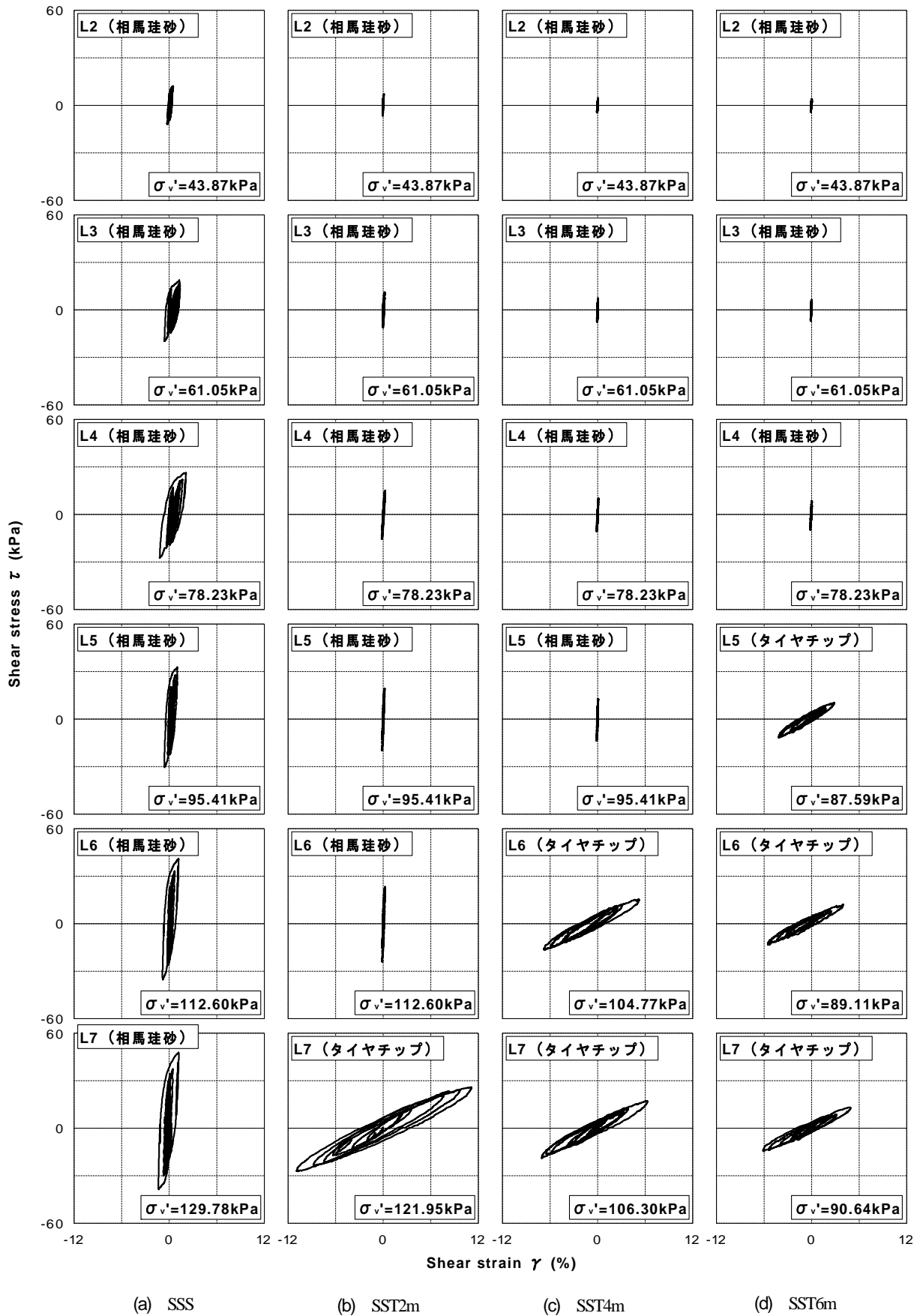


図-18 応力 - ひずみ関係

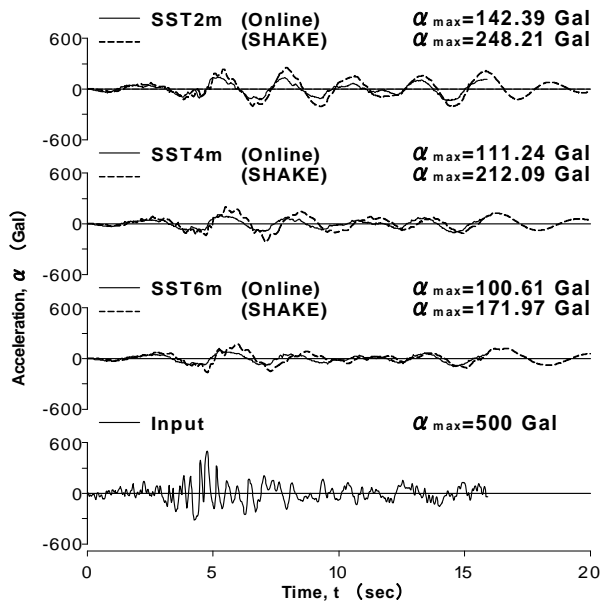


図-19 加速度時刻歴

で、全層砂とした場合SSSと比較して半分以下に低減されており、結果として地中構造物などへの影響は砂に比べ軽減されると考える。

図-16に示したオンライン地震応答解析と比較して、SHAKEによる解析結果は全応力解析であることから、図(a)の最大応答加速度、図(b)の最大応答水平変位、図(c)の最大せん断応力ともに応答値が大きくなっているが、タイヤチップを利用することで最大応答加速度が減衰することや、タイヤチップの混合率が増加するほど変位が大きくなること、タイヤチップを利用することでせん断応力が低減されることなど、オンライン地震応答解析の結果と同様の傾向を示すことが確認できる。

## 6. 砂・タイヤチップ互層地盤の応答

次に、砂とタイヤチップの互層地盤に対して、タイヤチップ層の層厚が地震応答に与える影響について検討する。表-2に示すように、層厚の影響を検討するため、最下層にタイヤチップ層を配置し、その層厚を2m, 4m, 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、および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において後ろに続く数字は最下層のタイヤチップ層の層厚を表している。

### (1) 有効応力経路およびせん断応力 - せん断ひずみ関係

図-17に全層砂とした場合SSSと最下層をタイヤチップ層として、タイヤチップ層の層厚を2m, 4m, 6mと変化させた場合SST2m・SST4m・SST6mのL2~L7層の有効応

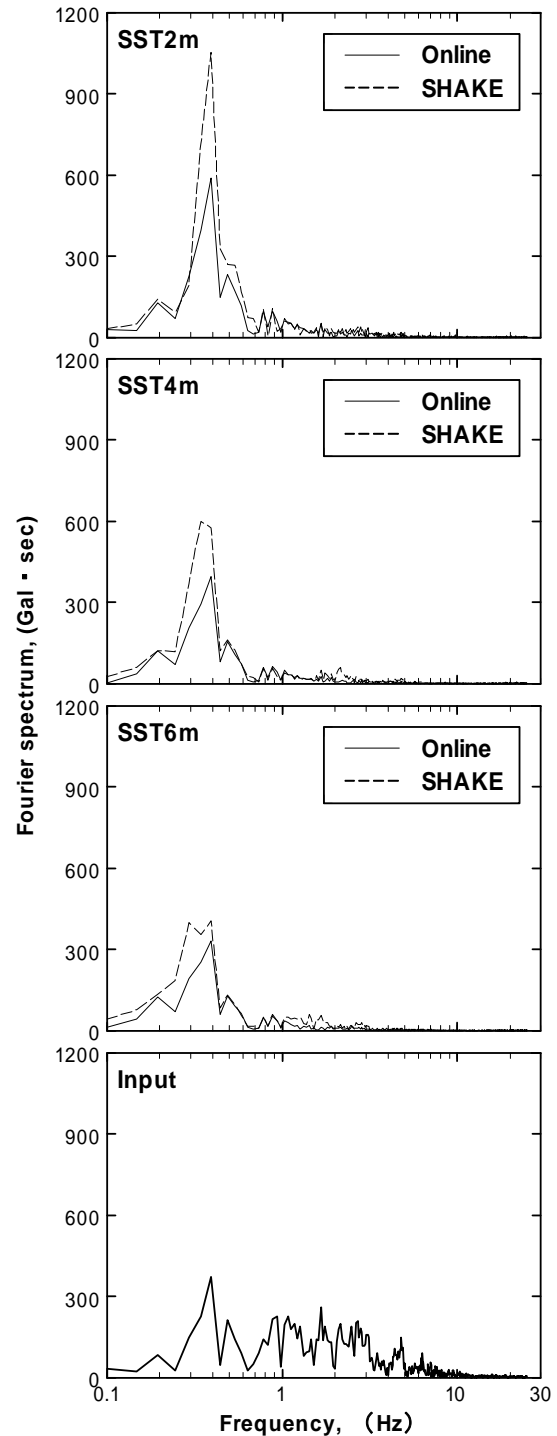


図-20 加速度フーリエスペクトル

力経路をそれぞれ示す。全層砂とした場合SSSにおいては、いずれの層においても地震動の主要動における間隙水圧の上昇による有効応力の低下が確認できるのに対し、タイヤチップを最下層に配置した場合は、いずれの実験ケースにおいても、タイヤチップ層で有効応力の低下が抑制されているだけでなく、上部の砂層でも有効応力の低下傾向はみられない。

図-18に同一層のせん断応力-ひずみ関係を示す。図より、いずれの実験ケースにおいても、タイヤチップ層

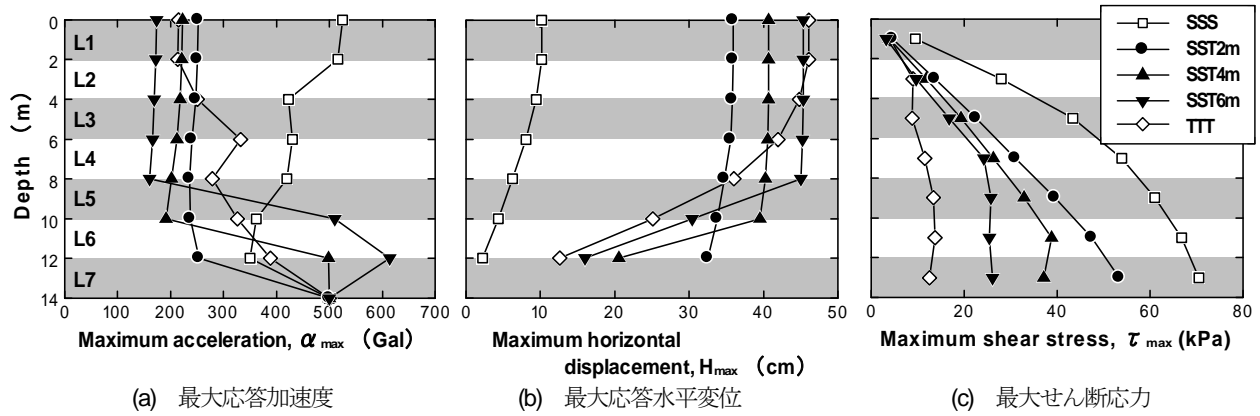


図-21 SHAKEによる解析結果

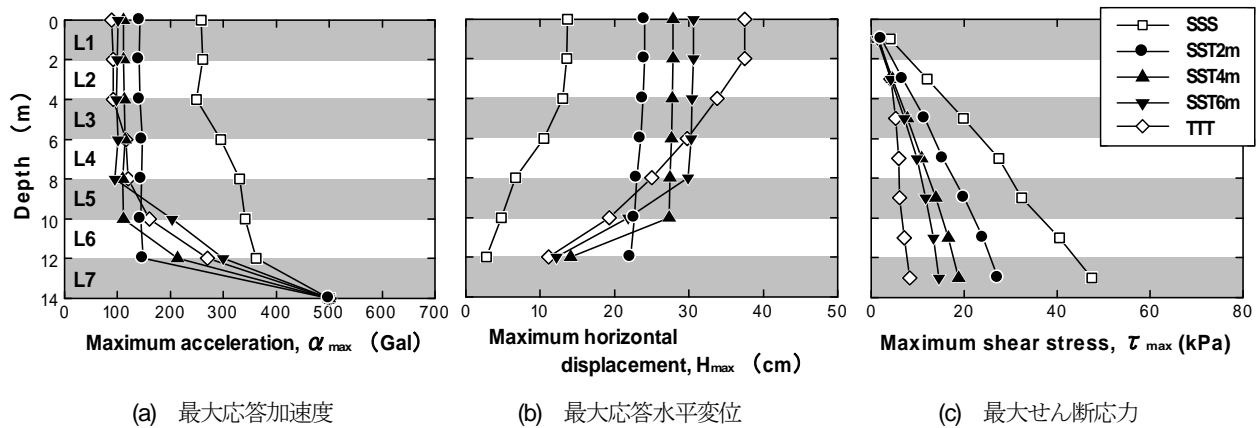


図-22 オンライン地震応答実験による結果

で大きなせん断ひずみが生じている。しかし、タイヤチップを最下層に配置した場合、上部の砂層ではせん断ひずみはほとんど生じないことが確認できる。

(2) 加速度応答時刻歴

図-19に最下層をタイヤチップ層とし、その層厚を変化させた場合SST2m・SST4m・SST6mの地表面における応答加速度の時刻歴を示す。タイヤチップ層の層厚を変化させた場合、層厚が大きいほど地震波が減衰・長周期化している。また、SST4m・SST6mはL2～L7層に占めるタイヤチップの割合がそれぞれ、33%・50%であり、タイヤチップを混合した場合S:T=7:3, S:T=5:5とほぼ同じタイヤチップ使用量となる。両者を比較すると、タイヤチップを層として配置した場合SST4m・SST6mの方がより地震波を減衰していることが確認できる

(3) 地表面応答加速度のフーリエスペクトル

図-20に最下層をタイヤチップ層とし、その層厚を変化させた場合SST2m・SST4m・SST6mの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。タイヤチップを層として配置することで1Hz以上の振幅が著しく減少し、地震波が長周期化していることが確認できる。また、

タイヤチップを混合した場合S:T=7:3, S:T=5:5と比較すると、長周期化の傾向は顕著となっており、地表面における加速度時刻歴の結果と合わせて考えると、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。

(4) 応答結果の深度分布

図-21にSHAKEによる最大応答加速度・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)の最大応答加速度はタイヤチップ層で大きく減衰し、地表面での値はタイヤチップ層の層厚が大きいほど小さくなっている。図(b)の最大応答水平変位はタイヤチップ層で値が著しく変化している。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、最下層のタイヤチップ層の層厚が厚いほど値が大きくなっている。図(c)の最大せん断応力はタイヤチップ層の層厚が大きいほど低下している。

図-22にオンライン地震応答解析より得られたそれぞれの結果を示す。砂・タイヤチップ混合地盤の解析と同じく、SHAKEによる解析結果はオンライン地震応答解析結果に比べ応答値そのものは大きいですが、オンライン地震応答解析の結果と同様の傾向を示すことが確認できる。

## 7. まとめ

本研究では、中空ねじりせん断試験機を用いてタイヤチップ混合砂の動的変形特性について検討するとともに、砂とタイヤチップの混合地盤および互層地盤を想定してSHAKEによる等価線形応答解析およびオンライン地震応答解析により、それらから成る地盤の地震応答特性を把握することを目的とした。本研究で得られた知見は以下の通りである。

- (1) タイヤチップのせん断弾性係数は砂に比べ非常に小さく、砂のせん断弾性係数もタイヤチップを混合することで著しく低下するが、ひずみの増加に伴うせん断弾性係数の低下は抑えられ、大きなひずみ域まで弾性的性質を示す。
- (2) タイヤチップの混合率が高いほど微小ひずみ域において高い履歴減衰率が発揮され、せん断ひずみの増加に伴う履歴減衰率の増加傾向は緩やかとなる。
- (3) タイヤチップは $G_{eq}/G_0 \sim \gamma$ および $h \sim \gamma$ 関係に対する有効拘束圧の影響を受けない。
- (4) 地盤内にタイヤチップを打設・混入することで、減震・免震効果が期待できる。タイヤチップを砂と混合する場合は、タイヤチップの混合率が高いほど、タイヤチップを層状に打設する場合は、その層厚が厚いほどより大きな効果が期待できる。
- (5) 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ことで、より大きな効果が期待できる。
- (6) SHAKEによる解析は、オンライン地震応答解析と比較して、応答値に違いがあるものの、地震波の減衰・長周期化の傾向や深度分布の形状など比較的うまく再現できる。特に、最下層にタイヤチップを配置した場合のタイヤチップ層の弾性的な挙動の影響などうまく再現している。

## 参考文献

- 1) ASTM : Standard practice for use of scrap tires in civil engineering applications, *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 22, No. 6, pp. 501-520, 1998.
- 2) Eleazer, W. E. and Barlaz, M. B. : Technologies for utilization of waste tires in asphalt pavement, *Utilization of Waste Materials in Civil Engineering Construction*, pp. 193-201, 1992.
- 3) Liang, R. Y. and Lee, S. : Short-term and long-term aging behavior of rubber modified asphalt paving mixture, *Recycled Rubber, Aggregate, and Filler in Asphalt Paving Mixtures*, No. 1530, pp. 11-17, 1996.
- 4) Maupin, G. W., Jr. : Hot mix asphalt rubber applications in Virginia, *Recycled Rubber, Aggregate, and Filler in Asphalt Paving Mixtures*, No. 1530, pp. 18-24, 1996.
- 5) Ahmed, I. and Lovell, C. W. : Rubber soils as lightweight geomaterials, *Lightweight Artificial and Waste Materials*

- for Embankments Over Soft Soils, No. 1422, pp. 61-70, 1993.
- 6) Humphrey, D. N., Standford, T. C., Cribbs, M. M. and Manion, W. P. : Shear strength and compressibility of tire chips for use as retaining wall backfill, *Lightweight Artificial and Waste Materials for Embankments Over Soft Soils*, No. 1422, pp. 29-35, 1993.
- 7) Upton, R. J. and Machan, G. : Use of shredded tires for lightweight fill, *Lightweight Artificial and Waste Materials for Embankments Over Soft Soils*, No. 1422, pp. 36-45, 1993.
- 8) Lee, J. H., Salgado, R., Bernal, A. and Lovell, C. W. : Shredded tires and rubber-sand as lightweight backfill, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 125, No. 2, pp. 132-141, 1999.
- 9) 菊池喜昭, 永留健, 御手洗義夫 : ゴムチップ混合固化処理土のせん断時の破壊メカニズム, 港湾空港技術研究所報告, 第45巻, 第2号, pp. 87-103, 2006.
- 10) ハザリカヘマンタ, 小濱英司, 鈴木嘉秀, 菅野高弘 : 緩衝材としてタイヤチップを用いた構造物の耐震性評価, 港湾空港技術研究所報告, 第45巻, 第1号, pp. 1-28, 2006.
- 11) Humphrey, D. N. and Manion, W. : Properties of tire chips for lightweight fill, *Grouting, Soil Improvement, and Geosynthetics*, No. 30, pp. 1344-1355, 1992.
- 12) Edil, T. B. and Bosscher, P. J. : Engineering properties of tire chips and soil mixtures, *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 17, No. 4, pp. 453-464, 1994.
- 13) Mased, E. M., Taha, R., Ho, C. and Papagiannakis, T. : Engineering properties of tire/soil mixtures as a lightweight fill material, *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 19, No. 3, pp. 297-304, 1996.
- 14) Zheng-Yi, F. and Sutter, K. G. : Dynamic properties of granulated rubber/sand mixtures, *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 23, No. 3, pp. 338-344, 2000.
- 15) 山田卓, 兵動正幸, 岡本真紀, ハザリカヘマンタ, 中田幸男, 吉本憲正 : タイヤチップ・砂混合土の非排水繰返しせん断特性, 第7回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, pp. 311-316, 2007.
- 16) Tsang, H. H. : Seismic isolation by rubber-soil mixture for developing countries, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 37, pp. 283-303, 2008.
- 17) 金子崇, 兵動正幸, 中田幸男, 吉本憲正, ハザリカヘマンタ : 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解析, 材料, Vol. 59, No. 1, pp. 20-25, 2010.
- 18) 御代田早紀, 村上哲, 小峯秀雄, 安原一哉, ヘマンタハザリカ : 港湾護岸構造物の地震時安定性向上を目指したタイヤチップス水平敷設裏込め地盤の適用性, 第9回環境地盤工学シンポジウム論文集, pp. 333-338, 2011.
- 19) 千葉隆仁, 山下聡, 土岐祥介 : 三軸試験と中空ねじり試験による砂の繰返し変形特性, 地盤および土構造物の動的問題における地盤材料の変形特性に関する国内シンポジウム発表論文集, pp. 181-186, 1994.
- 20) Schnabel, P. B., Lysmer, J. and Seed, H. B. : SHAKE a computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, Report No. EERC75-30, University of California, Berkeley, 1975.



- 21) 日下部伸, 森尾敏, 有本勝二: オンライン地震応答解析による 2 層系砂質地盤の液状化挙動, 土質工学会論文報告集, Vol. 30, No. 3, pp. 174-184, 1990.
- 22) 日下部伸, 森尾敏, 岡林巧, 藤井照久, 兵動正幸: 簡易単純せん断試験装置の試作と種々の液状化試験への適用, 土木学会論文集, No. 617/III-46, pp. 299-304, 1999.
- 23) 柴田明徳: 最新建築学シリーズ 9 最新耐震構造解析, pp. 69-72, 森北出版, 1981.
- 24) 社団法人土木学会: 実務に役立つ耐震設計入門, p. 128, 丸善, 2011.
- 25) 柴田明徳: 最新建築学シリーズ 9 最新耐震構造解析, pp. 79-108, 森北出版, 1981.
- 26) 大崎順彦, 原昭夫, 清田芳治: 地盤振動解析のための土の動力学モデルの提案, 第 13 回土質工学研究発表会, pp. 1057-1060, 1978.
- 27) 山口晶: 1995 年兵庫県南部地震における神戸沖合人工島の地震時挙動, 東北大学大学院工学研究科学学位論文, pp. 63-64, 2001.

(2012. 5. 2 受付)

## DYNAMIC DEFORMATION CHARACTERISTICS AND SEISMIC RESPONSE OF TIRE CHIPS AND MIXTURES WITH SAND

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

A series of dynamic deformation tests was performed on tire chips and their mixtures with sand with various proportion of tire chips by hollow cylindrical torsional shear testing apparatus. The shear stiffness of the sand specimen decreased drastically by mixing with the tire chips. However, the degradation of the stiffness dependent on magnitude of shear strain did not appear up to large strain level reflecting the elastic characteristics of the tire chips. Based on the findings, the seismic response analyses were carried out on the mixtures and alternating layers of sand and tire chips. Both the equivalent linear response analysis 'SHAKE' and the on-line pseudo-dynamic response analysis were performed aimed at clarifying the earthquake response characteristics of tire chips and tire chips-sand mixtures. The analyses results confirmed the quake-absorbing excess pore water pressure control and seismic isolation effects of tire chips as a geomaterial.