

戸建住宅基礎地盤にタイヤチップを用いた場合の地震被害（液状化・応答）低減効果について

近者 淳史¹・兵動 正幸²

¹報国エンジニアリング株式会社 本社 技術部 （〒561-0827大阪府豊中市大黒町3-5-26）

²山口大学大学院 理工学研究科 （〒755-8611 山口県宇部市常磐台2-16-1）

2011年東北地方大平洋沖地震による戸建住宅等の甚大な液状化被害の発生以降、こういった宅地における液状化被害の低減を目的とした工法に関心が集まっている。しかし現時点において、確固たる経済的で有効な対策技術・工法が無いのが実情である。そこで本研究では、リサイクル材であるタイヤチップを用いた地盤改良を住宅基礎下に用いることを提案し、液状化ならびに応答の低減効果をオンライン地震応答実験により確認したので報告する。またタイヤチップのせん断特性については、矢島¹⁾らの研究成果があるが、その力学特性に不明な点も多いので本研究では、タイヤチップの圧縮とせん断による体積変化挙動を明確にした。

キーワード タイヤチップ、液状化低減、地震応答低減

1. はじめに

2011年3月11日東北地方大平洋沖地震では、戸建住宅の液状化被害が続出し、国土交通省によると埋立宅地面積が大きい千葉県東京湾エリアの中でも、千葉県浦安市においては、8,700棟が不同沈下などの甚大な被害を受けたことを報告している。こういった状況下、液状化を防いだり、被害を軽減する対策工法に関心が集まっているが、経済的で有効な対策技術・工法が無いのが実情である。そこで本論文では、住宅基礎下にリサイクル材であるタイヤチップを用いた地盤改良を提案し、日本建築学会・小規模建築物基礎設計指針の簡易判定²⁾に標されている液状化の影響が地表面に及ぼす影響が小さくなるとされる地表面下の非液状化層圧2～3mを人工的に構築できたことならびに応答低減効果もあることを、オンライン地震応答実験により評価・確認したので報告する。また、タイヤチップのせん断特性については、矢島¹⁾らの研究成果があるが、その力学特性にはまだ不明な点が多いので、本研究では、タイヤチップの液状化抑制材料としての有効利用を考え、タイヤチップの圧縮とせん断による体積変化挙動を明確にし、さらに間隙水圧の発生機構を調べるため、タイヤチップ供試体に対し三軸試験機を用いて等方圧縮除荷試験およびCU、CD条件でのせん断載荷および除荷試験と平均主応力一定せん断試験をそれぞれ実施し、そして非排水繰返し三軸試験も実施し、液状化には至らないが若干発生する過剰間隙水圧について調べ、単調せん断との対応で考察を行った。

2. オンライン地震応答実験

(1) 実験概要と実験用地盤モデル

オンライン応答実験の概要と地盤モデルを図-1、図-2に示す。オンライン応答実験は、実験対象地盤を質点系にモデル化し、地震応答実験と要素試験としての単純せん断試験を同時に実施し、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付けて地震時の地盤挙動をシミュレートするものである。本手法によれば、複雑な土の構成式に頼らず、加速度、過剰間隙水圧時刻歴や有効応力経路などの実際の地盤の動的な液状化挙動の状態を評価することが可能となる。但し、多層からなる地

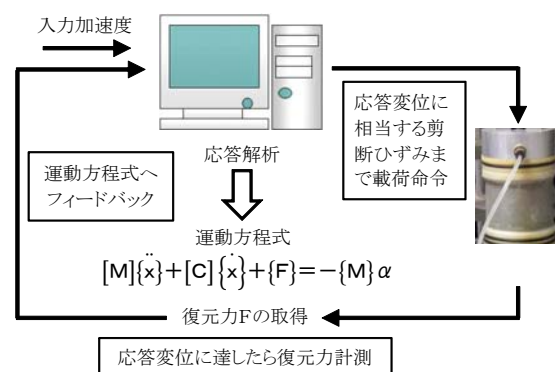


図-1 オンライン地震応答実験の概要

盤の全てをオンライン層にすることは、システムが高価になるばかりでなく作業も煩雑化するので、液状化が予想される地表面付近の3層(S1, S2, S3)のみオンライン層にして要素試験で復元力を求め、他の層は修正R-Oモデルで復元力を求めるサブストラクチャ法を採用している。なお、要素試験部分は、図-3に示す日下部ら³⁾によって作成された単純せん断試験装置を用いた。

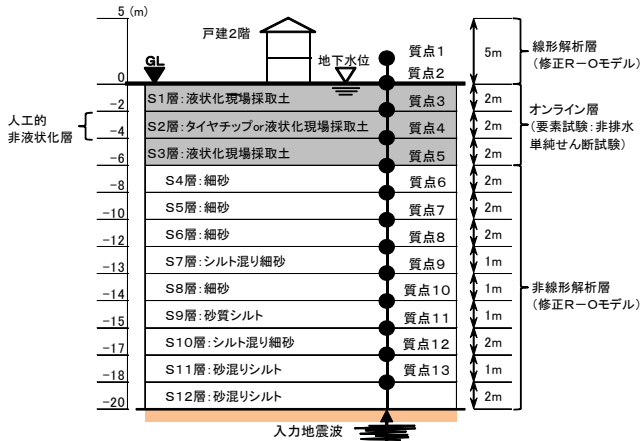


図-2 実験用地盤モデル

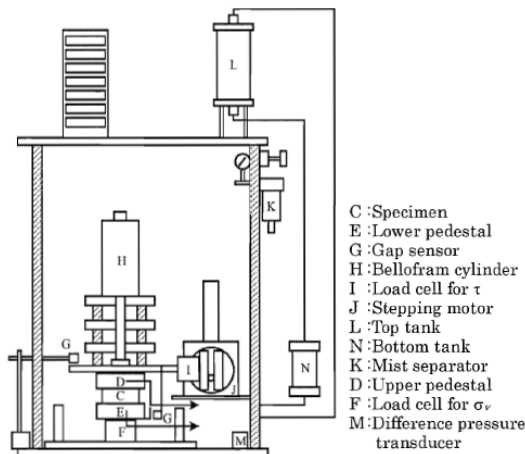


図-3 簡易単純せん断試験装置

(2) 試料および実験条件

実験試料には、千葉県浦安市今川地区の液状化被害宅地から砂質土を採取し用いた。タイヤチップに関しては、大型トラックの廃タイヤを粉状に細かく裁断した粒径1mm以下のタイヤチップを用いた。この粒径のタイヤチップを使った理由は、大きな粒径のタイヤチップにはワイヤーを抜いた小穴があり、粒子そのものの圧縮性がせん断特性に影響を与えることを避けるためである。表-1には試料の物理的性質を、図-4には試料の粒度分布を比較のため豊浦砂や日本港湾協会・港湾の施設の技術上の基準・同解説より、均等係数 U_c による特に液状化の可能性のある粒度分布範囲を共にそれぞれ示す。

実験ケースは表-2に示す2ケースであり、地下水位は実事象を勘案し地表面位置としている。また入力加速度は、図-5に示すNET 浦安(CHB008)地表面観測波を用いた。供試体は、直径6cm、高さ4cmで、採取試料の細粒分含有率 F_c が高く、飛散するので水中落下法にて作成し、相対密度 $D_r=50\%$ の飽和状態とした。

表-1 試料の物理的性質

試料	細粒分含有率 $F_c(\%)$	粒子密度 $\rho_s(\text{g/cm}^3)$	最大間隙比 $e_{\max}$	最小間隙比 $e_{\min}$	均等係数 U_c
今川地区砂系採取土	42	2.525	1.480	0.800	6.00
タイヤチップ	0	1.178	2.658	1.583	3.04
(豊浦標準砂)	0	2.635	0.973	0.635	1.32

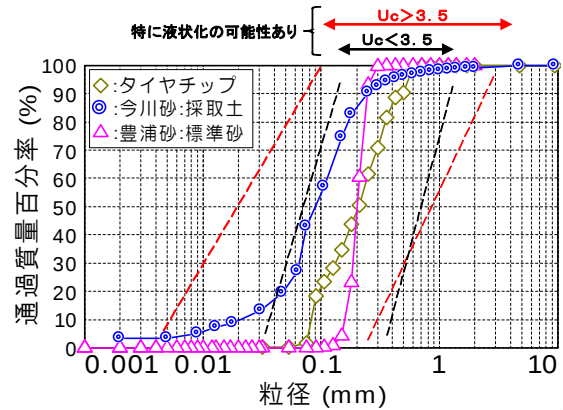


図-4 試料の粒径加積曲線

表-2 試料の物理的性質

層分割	実験ケース	
	未改良地盤モデル	改良地盤モデル
S1	液状化今川地区砂系採取土	液状化今川地区砂系採取土
S2	液状化今川地区砂系採取土	タイヤチップ
S3	液状化今川地区砂系採取土	液状化今川地区砂系採取土
S4~S12	飽和解析層	飽和解析層

オンライン層

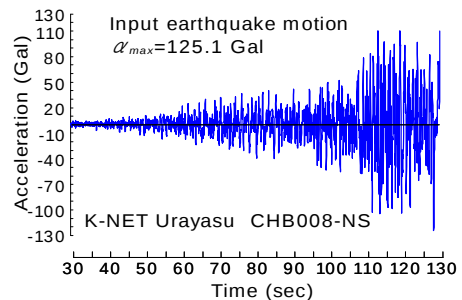


図-5 入力加速度波形

(3) 実験結果と考察

a) 有効応力経路およびせん断力—せん断ひずみ関係

図-6はオンライン層(S1, S2, S3)における有効応力経路を、未改良地盤モデルと改良地盤モデルの両ケースにつ

いて示し、同様のケースについてのせん断力—せん断ひずみ関係を示したものが、図-7である。

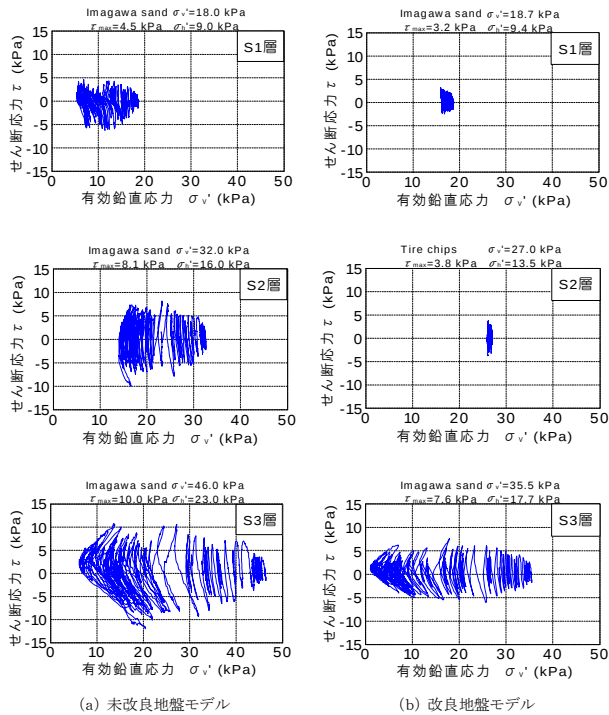


図-6 有効応力経路

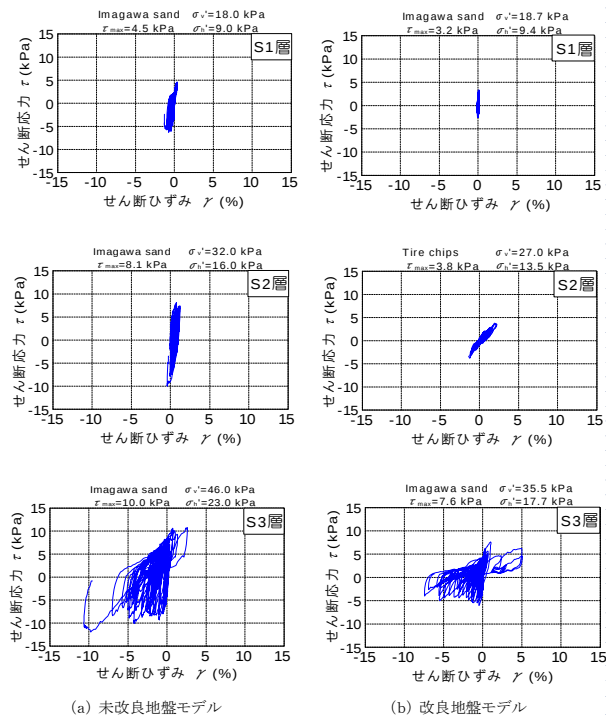


図-7 せん断応力—せん断ひずみ関係

3層は両ケースと大きく有効応力が減少し、せん断抵抗（剛性）の低下およびひずみの増大が著しく、いずれのモデル地盤もほぼ液状化に至っていることが確認できる。未改良地盤モデルの場合、下層であるS3層の液状化

により、地震動が伝搬しずらくなりS2層では完全に液状化に至っていないこと、S1層はS3層まではいかないが、液状化があることが見て取れる。一方改良地盤モデルの場合、タイヤチップ層であるS2層とその上層であるS1層においてもほとんど有効応力の減少は無く、せん断応力—せん断ひずみ関係もS2層、S1層ともに剛性は保たれ、ひずみの非線形性増大も無くほぼ線形のループを描いており、全く液状化が生じていないことが判る。また、タイヤチップは剛性が低く、粘弾性的な変形特性を持っていることも見て取れる。

b) 過剰間隙水圧時刻歴

図-8は100秒間、加振した際の過剰間隙水圧比の時刻歴を示している。過剰間隙水圧比の増加は、有効応力の減少を反映するが、図-6の有効応力経路と見比べるとリンクしていることが判る。未改良地盤モデルの場合、今川地区現場採取試料土であるS1, S2, S3の各層において、過剰間隙水圧比は0.9までは至っていないが、100秒間に大きく増加し液状化兆候が見て取れる。改良地盤モデルの場合、改良層直下の今川地区現場採取試料土であるS3層では、過剰間隙水圧比が0.97まで至っているにも関わらず、改良層であるS2層のタイヤチップ層では、過剰間隙水圧比が0.04とほとんど増加していない。また、この上層の今川地区現場採取試料土であるS1層でも、過剰間隙水圧比は0.14となっており、わずかに増加するに留まっている。

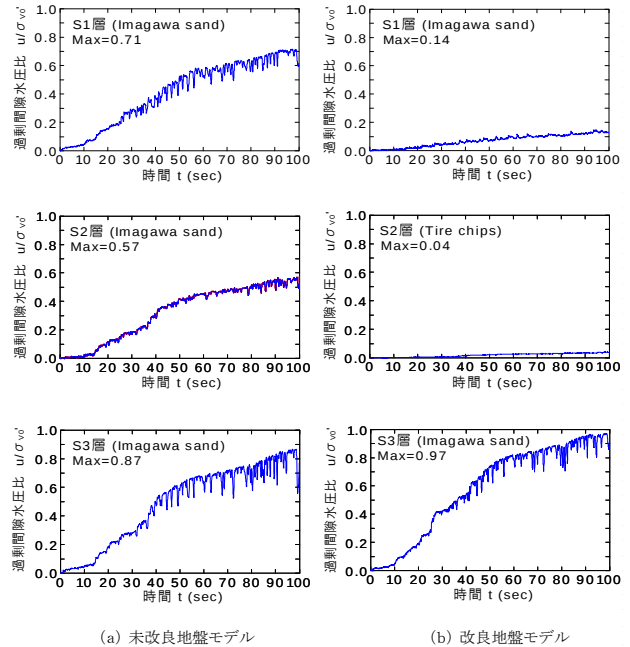


図-8 過剰間隙水圧比時刻歴

c) 加速度時刻歴および加速度フーリエスペクトル

図-9は図-2に示す地盤モデルにおいて、図-5に示す入力加速度波で100秒間オンライン地震応答実験を実施した際の家屋（質点1）における応答加速度時刻歴と加速

度フーリエスペクトルを示す。

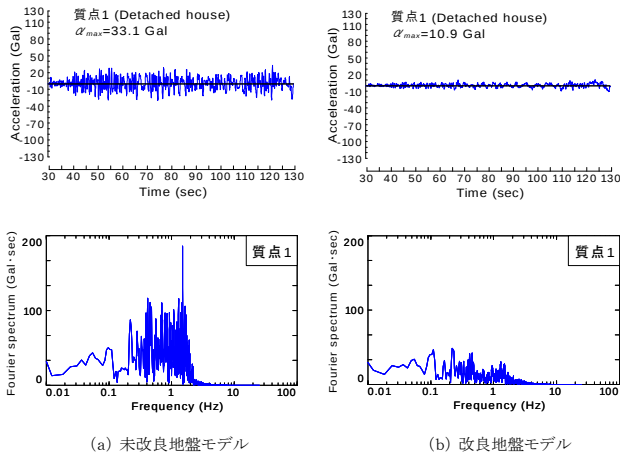


図-9 家屋（質点1）での応答
（加速度時刻歴とフーリエスペクトル）

この結果より、未改良地盤モデルと改良地盤モデルを比較すると、S2層をタイヤチップにより置換した場合、家屋の水平方向固有振動成分を含む0.1～5Hz間の周波数成分が低減されていることが見て取れ、この事象が起因し、家屋（質点1）における応答加速度のオールパス値の時系列データの最大値が、未改良の場合は33.1galで、改良の場合は10.9galとなり、家屋への伝搬加速度は1/3以下になったことを確認した。この応答振動低減事象は、S波がせん断抵抗のない液体中を伝搬しないことと同様に、タイヤチップはせん断抵抗が極めて低く、S波を伝え難い材料であることに起因するものと考えられる。なお、金子⁴⁾らの研究成果によると、タイヤチップの動的変形特性（せん断剛性、減衰比のひずみ依存性： $G_{eq}/G_0 \sim \gamma$ および $h \sim \gamma$ 関係）が 50kPa、100kPa、150kPa の範囲において有効拘束圧の影響を受けないことや、タイヤチップのせん断剛性は極めて小さくそれぞれの有効拘束圧において、砂の約0.01倍の値であることを確認している。

3. タイヤチップの圧縮およびせん断特性実験

(1) 実験概要

タイヤチップに対して、三軸圧縮試験により圧密非排水（CU）、圧密排水（CD）条件下で、平均主応力一定せん断試験、側圧一定せん断載荷および除荷試験、等方圧縮除荷試験をそれぞれ行った。三軸試験供試体は、直径5cm、高さ10cmであり、突固め法により13層に分けて突固めて作成した。その際、相対密度 $D_r=170\%$ を目標に突固めた。しかし、材料が非常に軽量で細かいことから供試体作成段階で試料が飛散してしまい相対密度を調整するのに困難を要したため数回試行錯誤の上供試体を作成した。飽和供試体作成のために、 CO_2 ガスを注入し、

その後、所定の拘束圧で圧密を行い、軸ひずみ速度0.1%/minでせん断を行った。さらに、軸ひずみが $\varepsilon_a=20\%$ に達した後に除荷を行った。なお、実験に用いたタイヤチップは、オンライン地震応答実験時と同様に表-1に示す物理的特性で、図-4に示す粒度分布のものである。

(2) 実験結果と考察

a) CU、CD条件での単調せん断試験および除荷試験

図-10に側圧一定排水単調せん断試験による軸差応力-軸ひずみ関係を示す。実験は拘束圧 50kPa、100kPa、200kPa において実施し、試料の圧密前の相対密度はそれぞれ $D_r=176.24\%$ 、 169.89% 、 165.61% であった。なお、図中実線は荷載時を、破線は除荷時を示す。図より、い

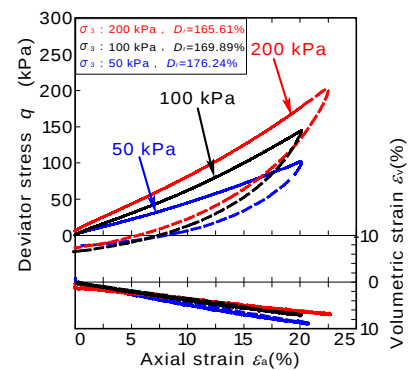


図-10 排水単調せん断試験軸差応力-軸ひずみ関係

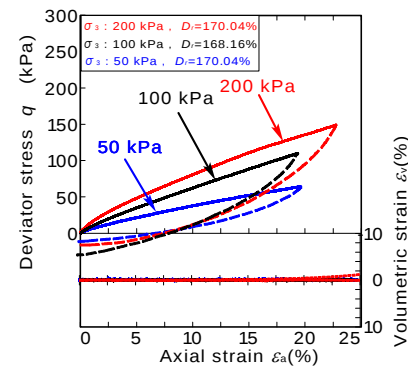


図-11 非排水単調せん断試験軸差応力-軸ひずみ関係

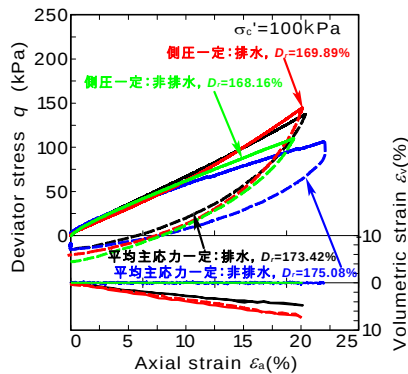
ずれの拘束圧条件においてもやや逆反りのひずみ硬化傾向を示し、体積変化も圧縮側に線形的に増加している様子が見て取れる。除荷試験時の軸差応力-軸ひずみ関係は、全体的に非線形弾性的挙動を示すが、 $q=0$ kPa のとき数%の塑性軸ひずみを残すが、体積変化は除荷時も載荷時と同様、線形的挙動を示すことが明らかである。

図-11は側圧一定非排水単調せん断試験による軸差応力-軸ひずみ関係を示す。拘束圧、相対密度はそれぞれ、50kPaで $D_r=173.50\%$ 、100kPaで $D_r=168.16\%$ 、200kPaでは $D_r=170.04\%$ である。いずれの拘束圧においてもピークは現れず線形的挙動を示し、図-10の排水試験時のような逆反りのひずみ硬化傾向は示さないが、非排水条件下に

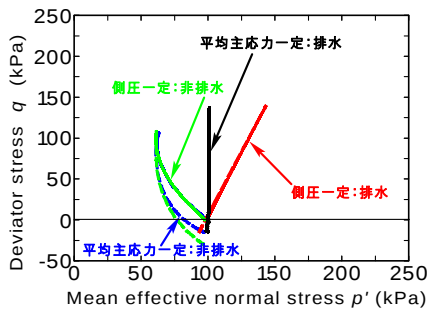
おけるせん断载荷により、過剰間隙水圧が発生し有効応力が低下したことに起因するものと考える。また除荷時には、排水単調せん断試験と同様な非線形弾性的挙動を示している。

b) 平均主応力一定せん断試験と等方圧縮除荷試験

図-12は(a)に拘束圧 100kPaにおける平均主応力一定せん断試験の軸差応力-軸ひずみ関係を、(b)にその有効応力経路を示し、比較のために側圧一定試験の結果も併せて表現した図となっている。平均主応力一定せん断試験における体積ひずみは通常の土ではダイレイタンスーによるものであるが、タイヤチップにおいてもそうなのか否かを調べた。また、図-13には等方圧縮・除荷試験による体積ひずみと有効応力の関係を示している。なお、図-12、図-13において実線は荷載時を、破線は除荷時を示す。



(a) 軸差応力-軸ひずみ関係



(b) 有効応力経路

図-12 平均主応力一定試験結果と側圧一定試験結果 ($\sigma'_c = 100\text{kPa}$)

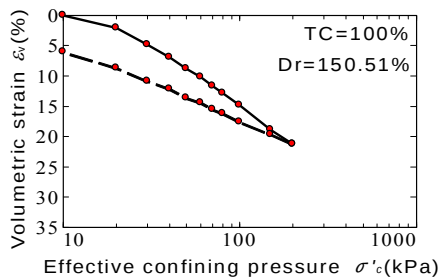
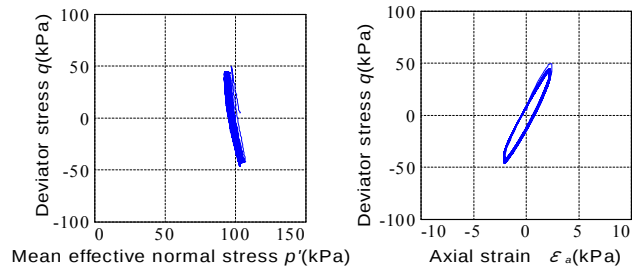


図-13 等方圧縮除荷試験結果

図-12 (a) より、平均主応力一定と側圧一定のいずれの試験の排水、非排水条件下においても、荷載時は $\varepsilon_a=20\%$ に至ってもピークは現れず線形的増加傾向を示し、限界状態に達していない。また排水試験では、体積変化も圧縮側にほぼ直線的な増加傾向を示している。そして、排水条件下での平均主応力一定試験と側圧一定試験結果での $\varepsilon_a=20\%$ 時点では、体積変化の差が約2%であるのに対し、 $\varepsilon_a=20\%$ 時点の q とこの q に対する側圧一定試験における平均主応力 p' を図-12 (b) から読取ると $p' \approx 140\text{kPa}$ となり、図-13より、拘束圧 100kPa と 140 kPa の体積ひずみ差が約4%と読取れ、差異があり、土の排水せん断時の体積変化のように、平均主応力増分とダイレイタンスーに起因するものの重ね合わせが成り立たないことが見て取れる。また、せん断除荷により体積変化が元に戻っている。さらに、図-12 (b) から非排水条件下の平均主応力一定試験ならびに側圧一定試験の結果より、荷載時に間隙水圧が発生し、除荷時にはこの間隙水圧も消失することが見て取れ、間隙水圧発生も弾性的体積ひずみによるものと考えられる。以上より、タイヤチップのせん断载荷による体積変化は、粒子移動を伴う非可逆的なダイレイタンスーによるものではなく、タイヤチップ粒子の弾性変形による可逆的な事象であると考えられる。

c) 繰返し三軸試験結果

図-14は (a), (b) に応力比 $\sigma_d/2\sigma'_c = 0.23$, $\sigma'_c = 100\text{kPa}$ での非排水繰返し三軸試験結果による有効応力経路と q - ε_a 関係を示す。



(a) 有効応力経路

(b) 軸差応力-軸ひずみ関係

図-14 非排水繰返し三軸試験結果

図-14 (a) より、繰返し回数の増加に伴い間隙水圧がわずかに増加してこと、また図-14 (b) より、初期载荷で大きな軸ひずみが発生するが、その後も繰返し载荷による軸ひずみの振幅の発達はなく同じヒステリシスループを描いていることが見て取れ、タイヤチップは液状化を生じる材料ではないことが明らかであることが判る。

4. おわりに

本研究では、リサイクル材であるタイヤチップを戸建

住宅基礎下の地盤改良に用いることにより、地震被害（液状化・応答）低減効果をオンライン地震応答実験で確認し、タイヤチップの不明な力学的特性について三軸試験機を用いてCU、CD条件下で、平均主応力一定せん断と側圧一定せん断の載荷・除荷試験および等方圧縮除荷試験をそれぞれ実施し、タイヤチップの圧縮とせん断による体積変化挙動を明確にした。本研究で得られた知見は以下の通りである。

- (1) タイヤチップを地盤モデルS2層(GL-2～-4m)に施した場合、その上層の未改良層S1層(GL-0～-2m)の過剰間隙水圧の発生も低く抑え、結果的に日本建築学会・小規模建築物基礎設計指針に標されている非液状化層を人工的に地表面から4m構築することができた。（この指針による簡易判定によると、地表面水平加速度が 200gal 程度の場合、地表面から非液状化層が3m以上存在する場合、液状化の影響が地表面に及ぶ影響は小となる。）
- (2) タイヤチップの低い剛性と弾性的変形特性が、応答加速度の低減に寄与し、改良地盤モデルは未改良地盤モデルと比較し、家屋の水平方向固有振動成分を含む0.1～5Hz間の周波数成分が低減され結果的に、家屋への伝搬加速度は1/3以下になったことを確認した。
- (3) CU、CD条件下でのせん断載荷・除荷試験結果より、軸差応力-軸ひずみ関係は非線形弾性挙動をとり、 $\varepsilon_a=20\%$ まで載荷しても限界状態に達しない。
- (4) 平均主応力一定せん断試験を実施し、発生した体積変化・間隙水圧も除荷試験を行うことで限りなく0%に戻ることで、タイヤチップのせん断による体積変化は、粒子移動を伴う非可逆的なダイレイタンスーによるものではなく、タイヤチップ粒子の変形による可逆的なものであると考えられる。

- (5) 繰返し三軸試験結果より、有効応力の低下はわずかで、軸差応力-軸ひずみ関係は粘弾性的な挙動を示し、初期載荷で大きな軸ひずみが発生するが、その後も同じヒステリシスループを描き、タイヤチップは液状化が生じる材料ではないことが判る。

本研究により、液状化に対し、地下水が地表面に存在したり、タイヤチップが細粒化するなど、悪条件が重なってもタイヤチップは、地盤改良材としてのポテンシャルを有していることを確認した。しかし、オンライン地震応答実験では、1次元の条件で実施されていることより、実地盤では周囲にタイヤチップ以外に地盤が存在していることや、タイヤチップ層の低い剛性に伴う水平・鉛直変形が加味されていない。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次元的な視野からの評価を実施していく必要があり、検討を続ける予定である。

謝辞：最後に本研究は、山口大学大学院生の今田光一氏、野田翔兵氏の協力によって実施しており、ここに記して、感謝する次第である。

参考文献

- 1) 矢島寿一，小倉一利，山田忠幸，小林展誠，丸井祐司，竹内基樹：タイヤチップのせん断特性と液状化特性，地盤工学ジャーナル，Vol4，No.1，pp.81-90，2009
- 2) 日本建築学会：小規模建築物基礎設計指針，ISBN978-4-8189-0574-0 C3052，丸善株式会社，pp.88-92，2008
- 3) 日下部伸，森尾敏，岡林功，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
- 4) 金子崇，兵動正幸，中田幸男，吉本憲正，Hemanta HAZARIKA：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，土木学会論文集C，Vol.69，No.1，pp.91-107，2013