

博士論文

タイヤチップの戸建住宅基礎地盤への適用のための
力学的性質の評価に関する研究

Mechanical Properties of Tire Chips for Its Application to
Foundation Soils of Detached Houses

平成 27 年 3 月

近者 淳史

山口大学大学院理工学研究科

学位論文要旨

学位論文題目：タイヤチップの戸建住宅基礎地盤への適用のための
力学的性質の評価に関する研究

2011年東北地方太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、確固たる経済的な有効な対策技術・工法が無いのが実情である。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、戸建住宅基礎地盤に適用することによる地震時での液状化防止と応答の低減効果を目的にしている。そのためまず、締固め作製したタイヤチップ供試体に対して、一連の排水・非排水条件で単調せん断載荷および除荷試験を行い、タイヤチップのせん断挙動およびそれに伴う体積変化挙動を調べた。また、非排水繰返し三軸試験も行い、発生する過剰間隙水圧について調べた。その結果、載荷時に発生した体積ひずみや間隙水圧は除荷時には、ほとんど0に戻ることや過剰間隙水圧そのものの発生が砂に比べ低いことが明らかとなった。次に得られた力学特性を勘案し、タイヤチップを戸建住宅基礎下に地盤材料として用いたモデルを想定し、オンライン地震応答解析を行った結果、タイヤチップの液状化防止ならびに震動の低減材としての有効性を確認した。本論文は以下の4章から構成されている。

第1章「序論」では、タイヤチップのリサイクル状況や新しい地盤材料としてタイヤチップを用いた既往の研究について述べ、タイヤチップを地盤材料として用いることの有用性を説明した。また、東日本大震災以降、甚大な被害があった戸建住宅の液状化問題がクローズアップされ、その結果、産官学をあげて様々な研究開発がされている中での、戸建住宅を対象とした液状化対策の現状をまとめ、本研究の背景と目的を述べた。

第2章「タイヤチップの力学特性」では、本研究で用いたタイヤチップ試料の物理的性質や実験方法について説明した。この章では、タイヤチップの最大の特徴である液状化抑制材料としての有効性を生かし実用化するためにまず、タイヤチップの圧縮、せん断特性を調べた。三軸試験機を用いて等方圧縮載荷・除荷試験、排水・非排水せん断載荷および除荷試験、平均主応

力一定せん断載荷・除荷試験をそれぞれ実施し、さらに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のメカニズムを調べ、それぞれの試験結果の対応で考察を行った。その結果、タイヤチップの力学特性として、タイヤチップのせん断載荷による体積変化は、そのほとんどが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ことが明らかになった。その他、中空ねじりせん断試験によって得られたタイヤチップの動的変形特性である初期せん断弾性係数は、いずれの有効拘束圧においても珪砂の約 1/100 程度の値になっており、液状化を起こした状態の砂と同程度の値であり、せん断波が伝搬し難い地盤材料であることを確認した。

第 3 章「タイヤチップ適用地盤の液状化防止・応答低減効果」では、第 2 章で確認・評価したタイヤチップの力学特性を勘案し、戸建住宅基礎地盤下の飽和砂地盤上にタイヤチップ適用した地盤改良を想定し、地震時の液状化および応答の低減効果について、せん断による地盤材料の間隙水圧の上昇に伴う有効応力の変化および材料の非線形も考慮でき、液状化過程まで扱える手法であるオンライン地震応答解析にて検討した。その結果、タイヤチップ改良層はもとより、その上層の未改良層の過剰間隙水圧の発生を防止し、応答加速度の最大値が時刻歴応答加速度で 1/3 に低減したことを確認した。また、英国ブリストル大学でバタチャリア博士の指導のもと、1G 場振動台模型実験も実施した結果、液状化事象を防止し、液状化に伴う沈下傾斜が生じていないことを確認した。

第 4 章「結論」では、各章ごとに得られた知見について要約するとともに、今後の課題を示し本論文の結論とした。

Abstract for PhD Thesis

Title : Mechanical Properties of Tire Chips for Its Application to Foundation Soils of Detached Houses

Since the Great East Japan Earthquake in 2011, much focus has been placed on soil liquefaction beneath small scale buildings such as detached houses, and thus construction methods to prevent liquefaction or lessen damage have gained attention. However, currently there are no proven techniques or construction methods to mitigate liquefaction damage to structures such as detached houses. The purpose of this study was to find the effects of ground improvement using tire chips, a recycled material, for detached house foundation grounds to prevent liquefaction during earthquakes and reduction of responses. To accomplish this, in order to investigate the characteristics of shear and volumetric strain and development of excess pore water pressure for compacted tire chips samples, a series of drained and undrained monotonic and undrained cyclic triaxial tests were performed. From the results of the monotonic tests, linear development of volumetric strains and excess pore water pressure were observed during loading up to 20% axial strain. It was further observed that the volumetric strain and excess pore water pressure induced by shear loading recovered to zero during unloading. In cyclic triaxial tests of tire chips, there was no marked development of pore water pressure, resulting in non-liquefaction. The on-line pseudo-dynamic response tests were performed aimed at clarifying the earthquake response characteristics of tire chips. The experimental results confirmed the quake-absorbing excess pore water pressure control and seismic isolation effects of tire chips as a geomaterial. This paper is composed of the following 4 chapters.

In chapter 1, "Introduction", the status of tire chip recycling, the history of studies regarding tire chips as a new geomaterial, and the utility of tire chips as a geomaterial were explained. Furthermore, following the Great East Japan Earthquake, the liquefaction of detached houses, where there was extensive damage, has been the focus of attention. As a result, the background and purposes of this study and current solutions for detached housing liquefaction as investigated by industry, government and academia were listed.

In chapter 2, "Mechanical Properties of Tire Chips", the physical properties and experimental methodology of tire chip specimens for this study were explained. In this chapter, the compressive and shearing properties were investigated in order for practical realization making use of the effectiveness of the most notable characteristics of tire chips as liquefaction-suppressing material. Using a triaxial apparatus, isotropic compression loading and unloading tests, drained and undrained shear loading and unloading tests, constant mean principal

shear stress loading and unloading tests were respectively implemented, as well as undrained cyclic triaxial tests. The mechanism behind the phenomenon of excess pore water pressure, which occurs slightly, yet does not lead to liquefaction, was researched, and discussion took place in correspondence with the various test results. As a result, it was discovered that in regard to the mechanical properties of tire chips, the volume change resulting in shear loading was not caused by irreversible dilatancy resulting from particle movement, but a reversible phenomenon, caused by elastic deformation of tire chip particles. Furthermore, with tire chips, much like the shear volume changes in soil, it was discovered that the superposition of mean principal stress increments and dilatancy do not hold. Otherwise, The hollow cylindrical torsional shear tests were conducted at various effective confining pressures. At any pressure, the initial shear modulus, the dynamic deformation properties of tire chips, which was obtained from the test was equal to one one-hundredth of levels for silica sand, and it was confirmed that tire chips are a geomaterial that shear waves do not propagate with ease.

In chapter 3, “Effects of Tire Chip Applied Ground Against Liquefaction and Response Reduction”, the mechanical properties of tire chips confirmed and evaluated in chapter 2 were taken under consideration, and aiming at using tire chips for ground improvement of saturated sand beneath detached houses foundation grounds, with regard to liquefaction during earthquakes and reduction of responses, we were able to give thought to the increase in pore water pressure from shear and resulting change in effective stress as well as non-linearity of materials, and deal with the liquefaction process, we investigated with on-line pseudo-dynamic response tests. As a result, in addition to that of tire chip improved levels, the occurrence of excess pore water pressure on the unimproved levels above was controlled, and it was confirmed that the maximum value of response acceleration was reduced to one third by time history response acceleration. Furthermore, when a 1G shaking table test was performed under the supervision of Prof. Bhattacharya of the University of Bristol in England, it was confirmed that the liquefaction phenomenon was controlled, and the settlement and sloping that accompanies liquefaction was prevented.

In chapter 4, “Conclusion,” the knowledge gained in each chapter was summarized, and future actions to be taken were expressed as this study’s conclusion.

目次

第1章 序論.....	1
1.1 概説.....	1
1.2 タイヤチップに関する既往の研究.....	4
1.3 戸建住宅を対象とした液状化対策の現状.....	7
1.4 本論文の目的と構成.....	13
1.4.1 本論文の目的.....	13
1.4.2 本論文の構成.....	14
参考文献.....	15
第2章 タイヤチップの力学特性.....	18
2.1 概説.....	18
2.2 実験に用いたタイヤチップ試料および実験方法.....	20
2.2.1 実験に用いたタイヤチップ試料.....	20
2.2.2 単調三軸圧縮試験.....	23
2.2.3 非排水繰返しせん断試験.....	25
2.2.4 中空ねじりせん断試験.....	27
2.3 タイヤチップの圧縮およびせん断特性.....	30
2.3.1 圧密排水せん断(CD)試験, 圧密非排水せん断(CU)試験 およびせん断除荷試験の結果.....	30
2.3.2 平均主応力一定せん断試験と等方圧縮除荷試験の結果.....	33
2.3.3 非排水繰返しせん断特性.....	36
2.3.4 载荷速度の影響.....	37
2.3.5 タイヤチップ粒子の圧縮・せん断メカニズムの考察.....	40
2.4 不均一住宅荷重に対するタイヤチップ改良地盤の変形の検証.....	42
2.4.1 解析条件と解析モデル.....	43

<目次>

2.4.2	解析結果と考察	47
2.5	タイヤチップの動的変形特性	53
2.6	本章の要約	59
	参考文献	62
第3章	タイヤチップ適用地盤の液状化防止・応答低減効果	63
3.1	概説	63
3.2	オンライン地震応答実験の位置づけと目的	65
3.2.1	地震応答解析法の現状	65
3.2.2	オンライン地震応答実験の位置づけ	67
3.3	オンライン地震応答実験による地震応答解析の概要	72
3.3.1	オンライン地震応答実験の概念	72
3.3.2	解析方法	74
3.3.3	実験装置の概要	84
3.3.4	実験アルゴリズム	89
3.3.5	実験方法	91
3.3.6	地盤のモデル化	93
3.3.7	本研究での非線形構成式におけるモデルパラメータの決定法	95
3.4	オンライン地震応答実験結果	97
3.4.1	実験に用いた試料	97
3.4.2	実験用地盤モデルならびに解析条件	100
3.4.3	実験結果	104
3.5	振動台模型実験による液状化防止効果の検証	111
3.5.1	実験概要	111
3.5.2	実験結果と考察	115
3.6	本章の要約	120
	参考文献	122

<目次>

第4章 結論.....	129
4.1 研究成果.....	129
4.2 今後の課題.....	135
参考文献	136
付録 振動台模型実験における各測点加速度時刻歴データ	137

第1章 序論

1.1 概説

近年の循環型経済社会の構築を背景に、リサイクルへの取り組みが建築・土木の分野でも活発に行われている。このような状況下、2011年の日本における廃タイヤの発生量¹⁾は、年間総発生量が9,700万本、年間重量で約102万1,000トンとなっており、昨今のエネルギー事情の影響を受け、代替燃料としての需要が非常に旺盛になっており、前年比で見ると増加しているが、リサイクル率は88%と高い。しかしその内訳は、57%がサーマルリサイクル（燃料利用）、17%がリユース（再使用）やマテリアルリサイクル（原料利用）、16%が海外輸出となっており（図1.1.1）、サーマルリサイクルの比率が大半を占め二酸化炭素発生による地球温暖化への影響や、焼却灰発生が懸念されこの分野での再利用促進が急務な課題となっている。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（そのまま利用）、タイヤシュレッズ（裁断後利用）、タイヤチップ（粒状破碎後利用）、ゴム粉（粉状後利用）と分類される。ちなみに廃タイヤ自体は、その成分は溶出試験の結果から環境面では問題はなく、欧米諸国では、最近では地盤材料として盛んに用いられている²⁾。例えばアメリカにおける廃タイヤ

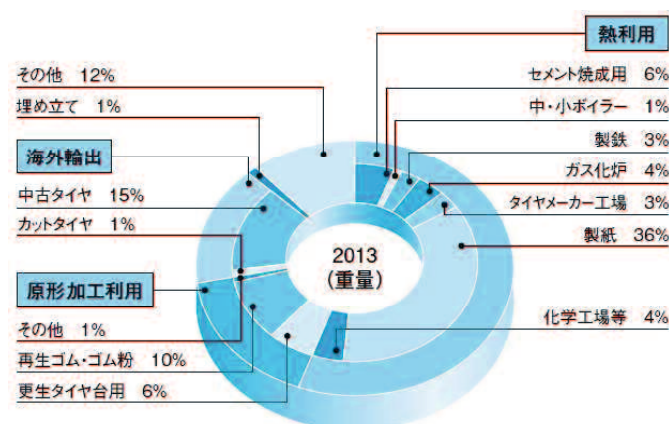


図1.1.1 2013年の廃タイヤリサイクル状況¹⁾

の施工事例としては、軟弱地盤への高速道路インターチェンジ敷設時の地盤材、擁護壁の背面の充填材料、路面からの凍結浸透防止（舗装材などの盛り上がり、われ防止）土盛り時の排水層の形成、鉄道軌道の振動吸収などを目的に使われているものがある。



写真1.1.1 千葉県浦安市における液状化による不同沈下

日本ではタイヤチップはまだ試験施工段階であるが、施工例としてはドレーン材料、クッション材料としての港湾構造物の耐震補強、タイヤチップ混合固化処理土などがある。現在検討されている廃タイヤの有効利用法としては、ホールタイヤを構造物基礎、盛土構築などに用いたり、タイヤシュレッズを埋立地材料や結防止材料に、タイヤチップをドレーン材料や靱性向上材料、振動・液状化抑制材料として港湾ケーソンの裏込め材料に利用することが考えられている。ゴム粉は舗装用アスファルト材料へ適用されている。

また、東日本大震災の際には、東京湾岸エリア、なかでも埋立宅地面積が大きい千葉県浦安市における戸建住宅を対象とした8,700棟にのぼる液状化の甚大な被害があり（写真1.1.1）、戸建住宅における地盤の液状化問題がクローズアップされ、その後様々な研究がなされているが、確固たる対策技術・対策工法が無いのが実情である。

こういった背景のもと、リサイクル材としてのタイヤチップの持つ低い剛性と体積変化のない弾性的性質に着目し、地盤改良材として戸建住宅の基礎下地盤に適用した場合、地震時の液状化抑制と応答低減に効果があるものと考え、本研究に取り組むことにした。そしてこの一連の研究が、タイヤチップの地盤改良材としての有効利用の一助につながるものとする。

本章は第1節で概説を、第2節でタイヤチップに関する既往の研究を、第3節で戸建住宅を対象とした液状化対策の現状を概観し、第4節で本論文の目的と構成を示す。

1.2 タイヤチップに関する既往の研究

海外では、建築分野においてTsang³⁾は、集合住宅・病院・事務所を想定した中低層ビルへの入力地震動軽減のために、基礎下地盤にタイヤチップを75%混合した地盤モデルを構築し、混合砂の層厚や動的変形特性、ビルの階数や幅などのプロポーシオンならびに基礎の根入れ長を変えて一連の地震応答解析を行っておりその結果、地震時の水平および鉛直加速度が未改良地盤に比べて、それぞれ数十パーセント抑えられることを示した。その他、土木分野においてRaoら⁴⁾は、タイヤチップのサイズと混合量を変化させた混合砂の三軸圧縮試験を実施し、最大高さ10mまでの道路盛土建設において有利で廃タイヤリサイクル利用の観点からも有効な地盤改良材と成り得るとしている。ただし、タイヤチップ質量配合は約20%を、有効拘束圧は150kPaを超えるべきでなく、このレベルを超えると大きな許容できない変形が生じる可能性があるとしている。またBergadoら⁵⁾は、既往の研究では、室内要素試験の関係上制限を受けることより、実際の形状・大きさのタイヤチップと異なるものが用いられることが多いので、大型三軸圧縮試験機にてより実寸に近い有効径5.21mm、最大径50mmの平板形状のタイヤチップを用い、直径300mm、高さ600mmの供試体を作成し試験を実施した結果、タイヤチップのみの供試体の応力ひずみ関係は直線（弾性）的であり、砂と比べて非常に弾性的であること、平板形状と立方体形状のタイヤチップを比較すると、平板形状のものはより圧縮性が大きいことや、タイヤチップの混入率が多いほど延性が増加し、強度が低下することを示している。また、砂とタイヤチップの比率が体積比で3：7、重量比で5：5程度を境に混合土の強度・変形特性が変わることを評価している。

日本においても、土木・建築分野でのタイヤチップの地盤材料としての利用は期待されているが、地震応答解析に必要とされる動的変形特性や液状化問題で重要なダイレイタンスー特性などの材料物性に未解明な事項が多く、材料固有の挙動を表現する構成モデルの研究にも至っていない。こういった力学特性に未解明な点が多いことより本格的な実用化には至っていない。最近の研究では、御手洗ら^{6),7)}が、脆性的変形を示す固化処理土に、タイヤチ

ップを混合することで、局所的なクラック発生と成長が抑制され、靱性改善効果が得られることを確認している。その理由としては、圧縮せん断においてタイヤチップから等方的な弾性反力が固化処理土に作用することで内部拘束圧が生じ、応力・ひずみの局所化を抑制し、靱性が発揮されるものと結論付けている。建築分野でも同様な研究がなされている。島村ら^{8),9)}は、固化処理土にゴムチップおよび繊維補強材（ナイロン系繊維）を混合した複合地盤材料について室内要素試験（一軸圧縮試験，ポアソン比試験，繰返し単純せん断試験）により，複合地盤材料がセメント改良土と比較して高靱性地盤材料であること，そして三次元 FEM 解析検討による地盤—杭基礎—上部構造の応答性状や，遠心裁荷装置を用いた振動台実験により地震時応答の低減を図れる可能性を示した。また金子，兵動ら^{10),11),12)}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，応答加速度低減や液状化低減の効果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ている。ハザリカラ¹³⁾も，建築物基礎下地盤にタイヤチップと砂の互層地盤を想定し，振動台模型実験を行っているが，乾燥状態の地盤で実験しているため応答変位・加速度の低減効果は捉えているが，液状化低減効果の有効性の説明はなされていない。一方，タイヤチップそのものの力学特性を評価した既往研究がある。矢島ら^{14),15)}は，三軸圧縮試験と液状化試験を行い，三軸圧縮試験においては，軸ひずみが 15%以下であるとタイヤチップ粒子間のせん断は生じず，破壊線も排水・非排水の条件によって異なったものとなるが，軸ひずみが 15%以降となるとタイヤチップ粒子間のせん断による体積ひずみが生じ始め，軸ひずみが 25%で排水・非排水の条件に関わらず一つの破壊線となることや，液状化試験では繰返し回数初期の段階で両振幅ひずみが 5%に達するが，過剰間隙水圧比が 0.9 以上となることはなく，タイヤチップ単体は液状化が生じる材料ではないと報告している。島田ら^{16),17),18)}は，タイヤチップ単体およびタイヤチップ混合砂のせん断時内部挙動を解明するため，X線 CT を併用した一面せん断試験も実施している。その他，タイヤチップは透水係数が大きいことよりを碎石の代用材料として利用しドレーン工法に適用し模型実験にて，液状化後地盤変

状に対する低減効果を確認した研究¹⁹⁾や、ホールタイヤを加工し、交通振動や建設作業振動に起因する地盤環境振動問題対策として地中振動遮断壁に適用し、その効果を確認・評価した研究²⁰⁾もある。

1.3 戸建住宅を対象とした液状化対策の現状

東日本大震災以降、液状化対策に関する研究開発が産官学をあげて精力的に行われているが、液状化対策の実用化までにはまだしばらく時間を要すると思われる。この節では、戸建住宅等の一般小規模建築物への適用実績、最近の研究開発動向を踏まえて、狭隘な土地に新築する場合の個別液状化対策として実現可能性のある工法と、住宅の特殊事情（工事費・施工環境・効果等）に配慮した適用上の留意点について述べる^{21), 22)}。

新築住宅の液状化対策には、一般建築物と同様な液状化そのものを防止する「発生抑制対策」と住宅が軽量であるがゆえに適用可能な液状化を許容した「被害抑制対策」とがある。

(1) 発生抑制対策

一般建築物に実績のある方法として、締固め工法、固化工法、変形抑止工法、排水促進工法などの液状化防止対策と杭基礎がある。

① 締固め工法

締固め工法は図 1.3.1 に示すように、砂・碎石・低流動モルタルを杭状に圧入して地盤を締固めて液状化を防止するものである。建築・土木ともに実績多く、常時荷重に対する支持力増加や沈下対策にもなり、設計方法も整備されている。

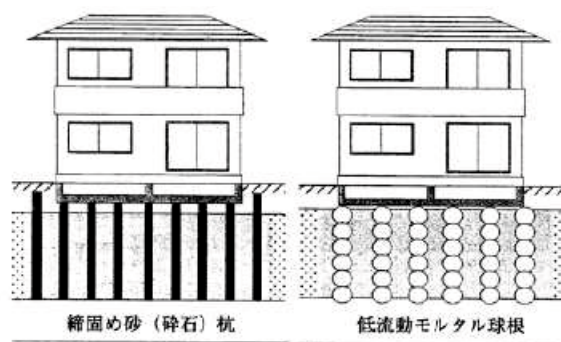


図 1.3.1 発生抑制対策：締固め工法²²⁾

〈留意点〉液状化防止には原地盤に対して 10%前後の圧入率が必要になり、施工時の地盤変位は避けられない。よって、施工順序の工夫や外周部に変位吸収孔を設けるなどの対応が必要となる。また、施工機械を反力として杭状体を圧入するため比較的大型の施工機械が必要であるが、住宅用として普及させるには小口径の杭体を効率良く構築できる小型施工機の開発が必要で

あるが一般的に、施工機械が小型化すると施工能率が下がりコストが増大するという問題も生じる。

② 変形抑制工法

変形抑制工法は図 1.3.2 に示すように、建物直下にソイルセメント地中壁を格子状に設け、地震時には地中壁の剛性によって内部地盤のせん断変形を抑制し液状化を防止するものである。実績も多く、常時荷重に対する支持力増加や沈下対策にもなる。特に住宅では、液状化層の直下に支持層が存在しない場合や防振対策としても有効である。

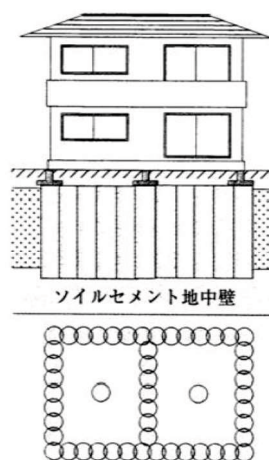


図 1.3.2 発生抑制対策：変形抑制工法²²⁾

〈留意点〉格子間隔が広いと効果が低く、改良体を確実にラップさせることが難しいほか、敷地境界や擁壁近傍では施工時の地盤変位に留意する必要がある。また、径 600mm 以下の単軸攪拌機では改良体がラップしない危険性があるので、多軸攪拌、連続攪拌方式を採用するのが望ましい。

③ 排水促進工法

排水促進工法は図 1.3.3 に示すように、地盤中に高透水性のドレーン材（有効パイプ・砕石杭）密に打設し、地震時に上昇しようとする間隙水圧をドレーン材によって逸早く消散させて水圧上昇を抑制するものである。締固め工法ほど大型施工機械を必要としないこと、振動や地盤変位が小さいので市街地或いは既存構造物近傍の液状化対策として、兵庫県南部地震までの実績は多い。

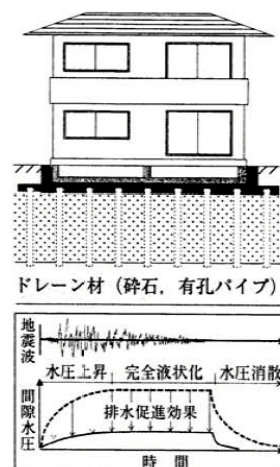


図 1.3.3 発生抑制対策：排水促進工法²²⁾

〈留意点〉設計には数多くの地盤データ（ドレーン材を含む）が必要であり、ドレーン間隔がこれらデータによって大きく変化する。また従来から、粘り強さに欠けるとの指摘があり、大地震時への対応が厳しい。さらに、細粒分を多く含む砂質

土には不適、施工範囲が狭いと周辺地盤の水圧上昇の影響を受ける排水を長期間維持するには材料選定・施工法に精緻さが必要など、適用上の課題も多い。一方、排水を伴うため地盤沈下は避けられないので、適用に関しては締め固め工法と併用するなどの対応が必要と思われる。

④ 固化工法

固化工法は図 1.3.4 に示すように、機械式攪拌や浸透注入により液状化の可能性のある全層を固化するものであり、セメント混合処理が主体である。液状化層が浅く、薄い場合には経済的かつ有効な方法である。

〈留意点〉地下水位以深の液状化層を固化するわけであるから、バックフォーによる混合攪拌方式では地下水を下げた状態で施工しない限り、均一に混合することが難しい。特殊な施工機械を使用する場合を除き、適用深度は最大でも 2m 程度と思われる。一方、浸透注入では細粒分を多く含む液状化層には、効果が低い、改良効果の確認が難しい、および周辺地盤への固化材の流出などの課題があり、戸建住宅での実績はほとんどない。



図 1.3.4 発生抑制対策：固化工法²²⁾

⑤ 杭基礎

杭基礎工法は図 1.3.5 に示すように、中間部の砂層が液状化しても杭材の水平抵抗と鉛直支持力によって住宅沈下を抑止するものである。杭基礎を採用するのは住宅の中でも比較的重い RC 系壁構造や独立基礎で設計される鉄骨系ラーメン構造の住宅である。

〈留意点〉柱状改良や小口径鋼管による地盤補強と異なって杭頭部と基礎スラブを一体化させるため、基礎が大型化する。また、液状化後の地盤沈下によって基礎下に空隙ができるので、設備配管のフレキブル化、空隙への充填処理が必要となる。

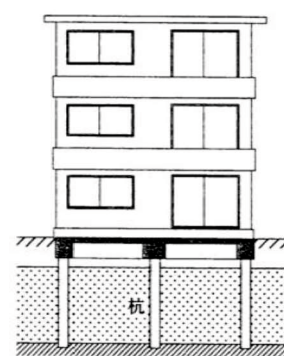


図 1.3.5 発生抑制対策：杭基礎工法²²⁾

(2) 被害抑制対策

地耐力増加対策として採用されたべた基礎や地盤補強を行った住宅も、周辺地盤は液状化によって沈下したものの、住宅被害は軽微であったとの報告も多い。このような経験を踏まえると、液状化層厚や液状化危険度に応じて適切な工法選定を行えば、「発生抑制対策」でなくても住宅等の小規模建築物であれば液状化対策として有効と思われる。

① べた基礎

べた基礎は図 1.3.6 に示すように、基礎剛性を高めて不同沈下を抑制することを目的とした対策。液状化層が薄く、液状化しても地表面への影響が小さいと判定されれば対応できる。

〈留意点〉沈下は避けられないので、液状化が生じた場合の地盤沈下量や住宅のめり込み沈下量を予測し、影響の程度を十分検討しておく必要がある。住宅の品質確保の促進等に関する法律（品確法）で規定されている傾斜角 3/1000

以上が予想される場合には、より有効な対策を採用すべきである。或いは、有害な不同沈下が生じた場合の対策として、出来る限り低コストで沈下修正可能な基礎や仕組みを採用しておく必要がある。

② 表層地盤改良

表層地盤改良は図 1.3.7 に示すように、液状化層上部を地盤改良することにより液状化層厚を減少させ、かつ改良層の剛性や荷重分散によって住宅に有害となる不同沈下量を抑制するものである。液状化層として残置される非改良層が薄く、液状化しても地表面への影響小と判定されれば対応できる。非改良層が厚い場合でも広いエリアを改良すれば、不同沈下の抑制には有効と思われる。最近では柱状改良と併用



図 1.3.6 被害抑制対策：べた基礎²²⁾

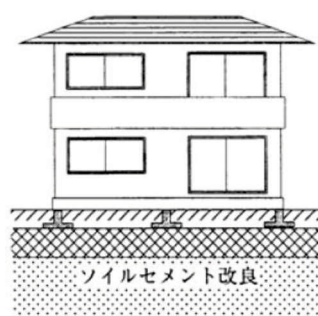


図 1.3.7 被害抑制対策：表層地盤改良²²⁾

する工法も開発されている。

〈留意点〉べた基礎と同様、沈下は避けられないので、液状が生じた場合の沈下量を予測し、影響の程度を十分検討しておく必要がある。地表面への影響を日本建学会「小模建築物基礎設計指針」による非液状化層 H_1 と液状化 H_2 の関係より判定する場合、 H_1 層が広く分布していること想定しているのに対し、単一住戸では改良範囲が局部的あることに十分注意する必要がある。また、不同沈下を想定して簡便に修復可能な対応策を考慮しておく必要がある。

③ 柱状地盤改良

表層地盤改良は図 1.3.8 に示すように、改良体の中間部の土層が液状化しても、その下部層の摩擦抵抗や先端支持力により鉛直支持力を保持し、住宅沈下を抑止するものである。住宅が軽量であることや液状化後は住宅から基礎への慣性力が極めて小さいことを前提とし、水平力に対する検討は液状化前の水平地盤反力を用いて行い、液状化後は鉛直支持性能のみ確保することを目的としたものである。



図 1.3.8 被害抑制対策：
柱状地盤改良²²⁾

〈留意点〉柱状地盤改良を行った住宅でも、 N 値 5~10 の砂層で改良体を支持させていた住宅では液状化による沈下被害が報告されてので、改良体を非液状化層に定着させる必要がある。液状化層に留める場合には、①、②と同様な沈下に対する検討が不可欠である。

④ 小口径杭による地盤補強

小口径杭による地盤補強は図 1.3.9 に示すように、③と同様な考え方で設計するものである。杭基礎との違いは基礎と杭頭を一体化せず、杭体により地盤補強するという考え方に基づいている。杭体を非排土で密に打設すれば、ある程度の締固め効果も期待できる。



図 1.3.9 被害抑制対策：
小口径杭による地盤補強²²⁾

〈留意点〉通常、杭状地盤補強では基礎根入れ

部の受動抵抗や基礎スラブ底面の摩擦抵抗を考慮して、水平力に対する検討は省略されるが、液状化により大きな地盤変状が予想される場合には、水平力に対する検討や杭頭を基礎にのみ込ませるなどの対策が不可欠であり、靱性の乏しい無筋の小口径モルタル杭やコンクリート杭も使用を避けるべきである。また、液状化後の地盤沈下によって基礎下に空隙ができるので、その対策が必要となる。

1.4 本論文の目的と構成

1.4.1 本論文の目的

本研究では、1.2節で既述している既往の研究成果を勘案し図1.4.1に示す概念にて、戸建住宅等の小規模建築物に対してタイヤチップによる地盤改良を適用することにより、液状化ならびに応答の低減効果を期待している。日本建築学会・小規模建築物基礎設計指針の簡易判定²³⁾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厚2~3mを人工的に構築することが基本的な考え方である。非液状化層厚に関しては、東北地方太平洋地震による液状化被害分析により、現在も論議されているところであるが、記憶に新しい戸建住宅の甚大な被害が起きた茨城県潮来市日の出地区に対する橋本ら²⁴⁾の調査研究によると、非液状化層厚が地表から1.7~1.8m程度以上あれば、建物の液状化による傾斜・沈下が軽減できているという報告がある。このタイヤチップを利用した地盤改良を戸建住宅に適用する際の、現場での品質管理を勘案する

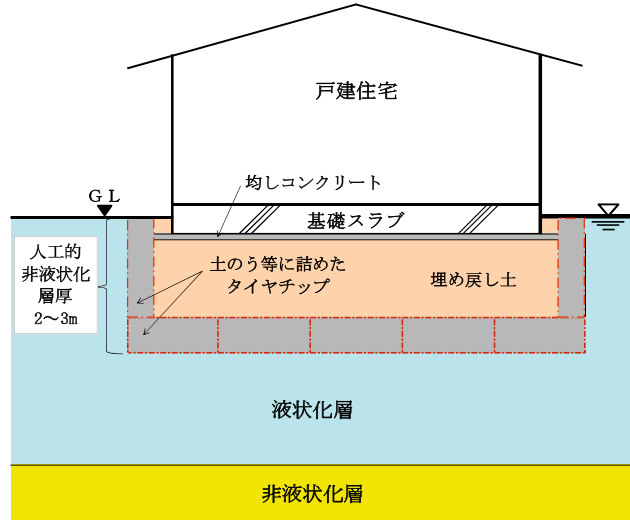


図 1.4.1 タイヤチップ地盤改良の概念図

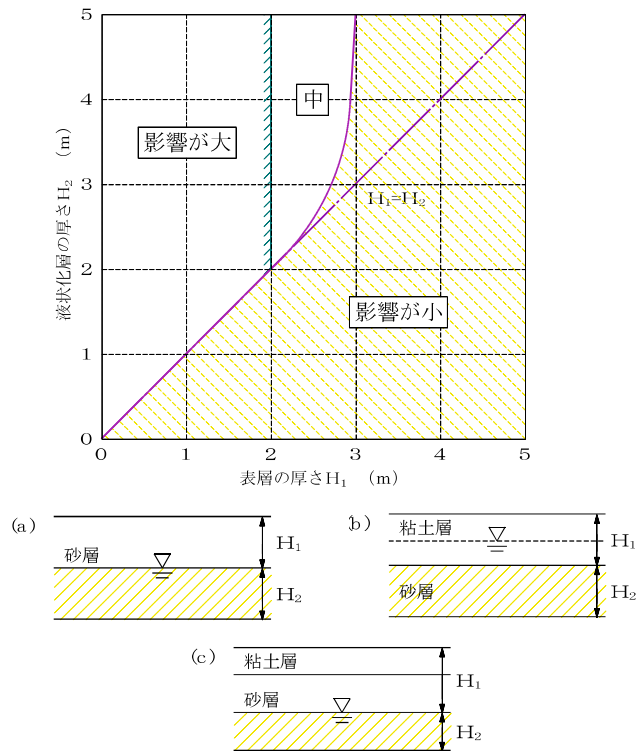


図 1.4.2 液状化の影響が地表面に及ぶ程度の判定²³⁾

とタイヤチップは単体で用いた方が管理し易いと考えている。しかしながら、既往の研究ではまだ、粒状体としてのタイヤチップ単体の力学特性には、未解明な点が多く実用化に至っていない。

本研究では、タイヤチップの最大の特性である液状化抑制材料としての有効性を生かし実用化するために先ず、タイヤチップの圧縮、せん断特性を調べた。三軸試験機を用いて等方圧縮・除荷試験、排水・非排水せん断・除荷試験、平均主応力一定せん断・除荷試験をそれぞれ実施し、さらに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のメカニズムを調べ、それぞれの試験結果の対応で考察を行った。また、中空ねじりせん断試験より得られた広範なひずみ域におけるタイヤチップの動的変形特性を調べた。これら得られた力学特性を勘案し、オンライン地震応答解析を実施し、タイヤチップを住宅基礎地盤に敷設することによる液状化ならびに応答の低減効果について考察した。また、図 1.4.1 に示すタイヤチップ地盤改良の概念図をイメージして、イギリス・ブリストル大学にてバタチャリア博士指導の下、実施した 1G 場振動台模型実験においても考察し、タイヤチップの戸建住宅基礎地盤への適用によるその有効性を明らかにすることを目的としている。

1.4.2 本論文の構成

本論文は以下の全 4 章から構成される。

第 1 章 「序論」

第 2 章 「タイヤチップの力学特性」

第 3 章 「戸建住宅タイヤチップ適用地盤の液状化防止・応答低減効果」

第 4 章 「結論」

参考文献

- 1) 一般社団法人 日本自動車タイヤ協会ホームページ：日本のタイヤ産業
2014 <http://www.jatma.or.jp/media/pdf/tioj-j12.pdf>
- 2) 御手洗義夫，安原一哉，菊池喜昭，大谷順，Ashoke K Karmokar：古タイヤ
ゴムチップの地盤材料としての有効利用と環境影響について，第6回
環境地盤工学シンポジウム発表論文集，pp.351-358，2005.
- 3) H.H.Tsang：Seismic isolation by rubber-soil mixture for developing countries,
Earthquake engineering and structural dynamics, Vol.37, pp.283-303, 2008.
- 4) G.V.Rao and R.K.Dutta：Compressibility and strength behavior of sand-tyrechip
mixtures, *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol.24, pp.711-724,
2006
- 5) D.T.Bergado, S.Youwai and A.Rittirong：Strength and deformation
characteristics of flat and cubical rubber tirechip-sand mixtures, *Geotechnique*
Vol.55, pp.603-606, 2005.
- 6) 御手洗義夫，中村裕，大谷順：古タイヤのゴム弾性を有効利用した新しい
地盤材料の開発，材料，Vol.57, pp.77-82，2008.
- 7) 御手洗義夫，菊池喜昭，安原一哉，大谷順，永留健：古タイヤを用いたゴ
ムチップ混合処理土の靱性およびせん断変形に伴う透水性の変化，土木学
会論文集 C，Vol.64, pp.181-196，2008.
- 8) 島村淳，岸本美季，柏尚稔，宮本祐司：ゴムチップと繊維材を用いた複
合地盤材料の力学特性に関する研究，日本建築学会技術報告集，Vol.17,
pp.61-66，2011.
- 9) 島村淳，藤井達，松本優資，柏尚稔，宮本祐司：ゴムチップを用いた複合
地盤材料の応答低減効果に関する実験研究，日本建築学会大会学術講演梗
概集（北陸），pp.681-682，2010.
- 10) 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実験，材料，
Vol.59, pp.20-25，2010.
- 11) T.Kaneko，R.P.Orense，M.Hyodo，N.Yoshimoto：Seismic Respose
Characteristics of Saturated Sand Deposits Mixed with Tire Chips, *Journal of*

- Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, pp.633-643, 2013.
- 12) 金子崇, 兵動正幸, 河田慎治郎, 吉本憲正, ハザリカヘマンタ: オンライン地震応答実験によるタイヤチップの免震効果の評価, 第43回地盤工学研究発表会発表講演集, PP.537-538, 2008.
 - 13) ハザリカヘマンタ, 五十嵐信貴: タイヤチップを免震材として用いた基礎地盤の改良効果, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), pp.475-476, 2009.
 - 14) 矢島寿一, 小倉一利, アショカ・K・カルモカル, 安原一哉: 古タイヤチップスの地盤材料としての力学評価, 地盤工学ジャーナル, Vol.1, No.1, pp.1-7, 2006.
 - 15) 矢島寿一, 小倉一利, 山田忠幸, 小林展誠, 丸井祐司, 竹内基樹: タイヤチップスのせん断特性と液状化特性, 地盤工学ジャーナル, Vol.4, No.1, pp.81-90, 2009.
 - 16) 島田里美, HazarikaHemanta, 大谷順, 菊池喜昭, 御手洗義夫: X線CTを用いたタイヤチップの一面せん断挙動, 第43回地盤工学研究発表会発表講演集, PP.527-528, 2008.
 - 17) 島田里美, HazarikaHemanta, 大谷順, 菊池喜昭, 御手洗義夫: 地盤材料としてのタイヤチップの一面せん断挙動—X線CTの適用—, ジオシンセティックス論文集, Vol.23, pp.75-82, 2008.
 - 18) 島田里美, 大谷順, HazarikaHemanta, 菊池喜昭: タイヤチップ混合砂の一面せん断特性における弾塑性挙動, 第44回地盤工学研究発表会, pp.409-410, 2009.
 - 19) 安原一哉, 岡田憲太, 大塚友樹, 増田拓哉, 小峰秀雄, 村上哲: タイヤチップスドレーンによる砂地盤の液状化後変状低減, 土と基礎, Vol.53, pp.9-11, 2005.
 - 20) 中谷郁夫, 早川清, 樫木孝彦, 西村忠典: スクラップタイヤを用いた地中振動遮断壁の提案とその振動低減効果の評価, 土木学会論文集 G, Vol.64, pp.46-61, 2005.
 - 21) 地盤工学会関東支部: 造成宅地の耐震対策に関する研究員会報告書—液状化から戸建て住宅を守るための手引き—, 2013.5.

- 22) 真島正人：小規模建築物の液状化，基礎工，Vol.40，No.10，pp.26-29，
2012.10
- 23) 日本建築学会：小規模建築物基礎設計指針，pp.89-92，2008.
- 24) 橋本隆雄，安田進：2011年東北地方太平洋沖地震による潮来市日の出地区の液状化被害分析，土木学会論文集 A1，Vol.68，No.4，pp.1266-1277，
2012.

第2章 タイヤチップの力学特性

2.1 概説

前章で既述したように東日本大震災以降、戸建住宅等を対象とした宅地での液状化問題がクローズアップされ、産官学をあげて精力的に研究開発が行われているが、実用化までに未だしばらく時間を要し、現時点において確固たる対策技術・対策工法が無い一番の理由は、やはり戸建住宅についての特殊事情であるコストの問題、いわゆる費用対効果の問題であると考えられる。こういった背景のもと、本研究ではリサイクル材としての安価なタイヤチップを地盤材料として、戸建住宅基礎地盤に適用することを考えた。そして適用の際は、住宅重量が軽量であることや住宅業界での現場管理・品質管理それにコストを勘案した場合、タイヤチップを現場土や持込砂と混ぜて用いるより、タイヤチップ単体で用いた方が管理し易いものと考えている。また、その方がタイヤチップの持つ低い剛性と体積変化のない弾性的な特性を最大限引出すことができ、液状化防止・応答低減効果に寄与するものと考えられる。しがしながら前章で既述通り、既往の研究ではまだ、粒状体としてのタイヤチップ単体の力学特性には、未解明な点が多く実用化には至っていない。

本研究ではまず、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特性と単調および繰返しせん断特性等の力学特性を調べた。具体的には、タイヤチップへの圧縮とせん断載荷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排水・非排水条件下でのせん断載荷および除荷試験ならびに平均主応力一定せん断試験をそれぞれ実施した。さらに、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の発生メカニズムを調べ、単調せん断載荷との対応で考察を行った。次に地震時挙動を把握するための地震応答解析を実施する準備として、タイヤチップの等価せん断弾性係数 G_{eq} や履歴減衰率 h といった動的変形特性を知る必要がある。これらのタイヤチップの動的変形特性についての既往の研究に、タイヤチップ砂混合試料について中空ねじりせ

ん断試験機を用いてその動的変形特性を求めた金子, 兵動らの研究成果がある¹⁾。本研究ではこの研究成果を, タイヤチップと相馬珪砂の各単体に整理し直し, 比較考察している。

以下, 節に従って本章を概説する。先ず第2節では, 実験に用いた試料および実験方法について述べる。次に第3節では, 実験結果としてタイヤチップの圧縮特性と単調および繰返しせん断特性について述べ, 第4節では, 不均一住宅荷重に対するタイヤチップ改良地盤の変形を有限要素法による2次元平面ひずみ弾性解析にて検証し, 第5節でタイヤチップの動的変形特性について, 既往の研究成果を整理し直しまとめ, 考察している。最後に第6節において, 本章で得られた知見を整理し要約を述べる。

2.2 実験に用いたタイヤチップ試料および実験方法

2.2.1 実験に用いたタイヤチップ試料

本研究では、試料として大型トラックの廃タイヤを粉状に細かく裁断した粒径 0.5mm 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孔があり、粒子そのものの圧縮性がせん断特性に影響を与える²⁾ことを避けるためである。実験に用いたタイヤチップの写真を写真 2.2.1 に、マイクروسコープによるタイヤチップ粒子単体を撮影した写真を写真 2.2.2 に示す。タイヤチップ粒子単体の表面形状は、非常に複雑な歪な形状を呈していることがわかる。表 2.2.1 には試料の物理的性質を、図 2.2.1 には試料の粒度分布を比較のため豊浦標準砂と共にそれぞれ示す。

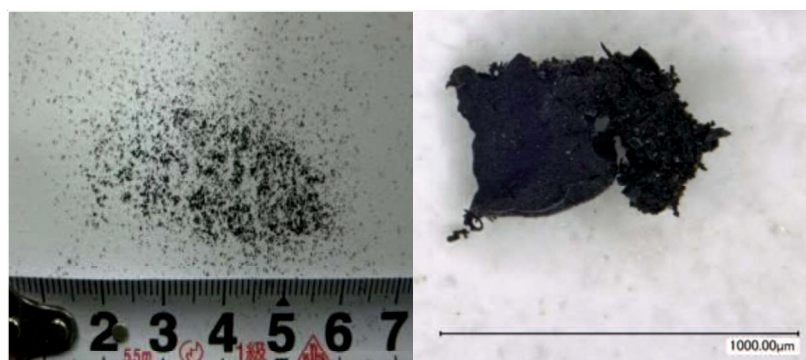


写真2.2.1 タイヤチップ 写真2.2.2 タイヤチップ粒子

表 2.2.1 試料の物理的性質

試料	タイヤチップ	豊浦標準砂
細粒分含有率： F_c (%)	26	0
粒子密度： ρ_s (g/cm ³)	1.178	2.635
最大密度： ρ_{dmax} (g/cm ³)	0.456	1.645
最小密度： ρ_{dmin} (g/cm ³)	0.322	1.335
最大間隙比： e_{max}	2.658	0.973
最小間隙比： e_{min}	1.583	0.635

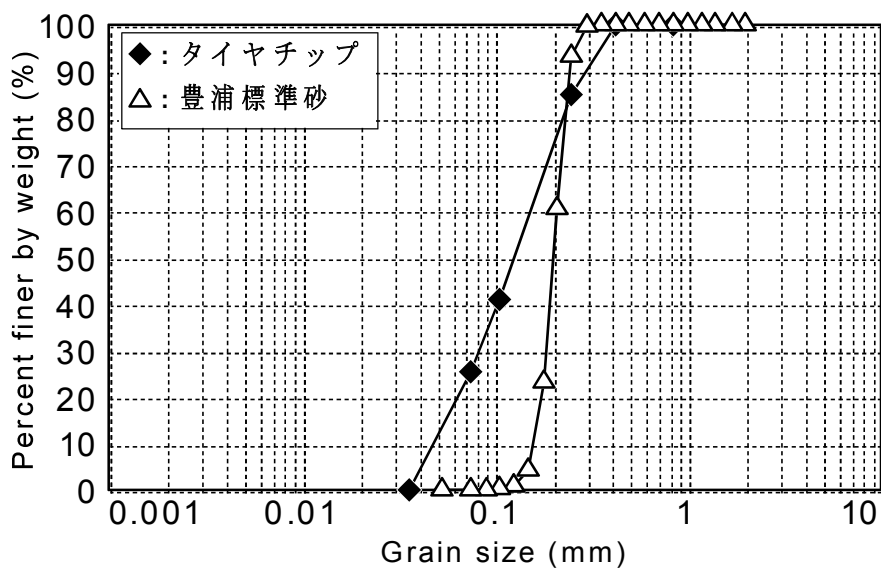


図 2.2.1 試料の粒径加積曲線



写真 2.2.3 ルシャテリエフラスコ

なお、試験で用いたタイヤチップ試料はリサイクル品であり、製造過程にてどのような粒径が混在しているかが不明であることや、粒径は力学特性に影響する要因であるため通常の JIS Z 8801-1 規格以外のふるいを追加して実施している。タイヤチップの最小密度および最大密度は、「砂の最小密度・最大密度試験(JIS A 1224)」に準じて求めた。ただし、タイヤチップ粒子密度に関しては、通常の土粒子と同様に実施するとタイヤチップが水面に浮遊するので、「ルシャテリエフラスコと灯油を用いたセメント密度試験(JIS R

5201)」を実施し求めた。(写真 2.2.3) タイヤチップ粒子の密度は 1.2g/cm^3 程度であり豊浦標準砂の土粒子密度に比べ約半分以下しかなく、タイヤチップは軽量材料であることがわかる。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製した。三軸試験装置に設置された供試体の初期状態の物性値は、目標乾燥密度が $\rho_d=0.640\text{g/cm}^3$ 、間隙比が $e=0.830$ 程度になるよう統一して突固めた。これを相対密度で表示すると、 $D_r=170\%$ となった。これは、タイヤチップは弾力性があり、砂の最大密度試験 (JIS A 1224) の適用において、モールド側壁の打撃では十分に締固めることができず、上部からの突固めの方がより密に締まったことによる。供試体作製の際には、このようにタイヤチップが弾力性があり軽量で細かいことから、飛散してしまい目標とする供試体密度を調整するのに困難を要したため数回試行錯誤のうえ供試体を作製した。また、供試体を飽和するために、まず CO_2 ガスを注入し、その後脱気水を通水し、背圧 200kPa を与え、B 値 0.95 以上を確保した。その後所定の拘束圧を付加し、10 時間以上かけて体積圧縮が収まるまで圧密を行った。せん断は、軸ひずみ速度 $0.1\%/min$ で行い、軸ひずみが $\varepsilon_a=20\%$ に達した後、せん断除荷試験を同じひずみ速度で実施した。除荷は軸ひずみが完全に戻る $\varepsilon_a=0$ の時点で試験終了とした。除荷を行ったのは、せん断による体積変化挙動がタイヤチップの粒子移動を伴うダイレイタンスーによるものか、個々の粒子の弾性変形によるものかを見極めるためである。

2.2.2 単調三軸圧縮試験

本研究において、単調荷重試験を行った三軸圧縮試験装置の配管系統を図 2.2.2 に示す。この試験機は、任意の軸ひずみ速度で圧縮・伸張試験を行うことが可能である。

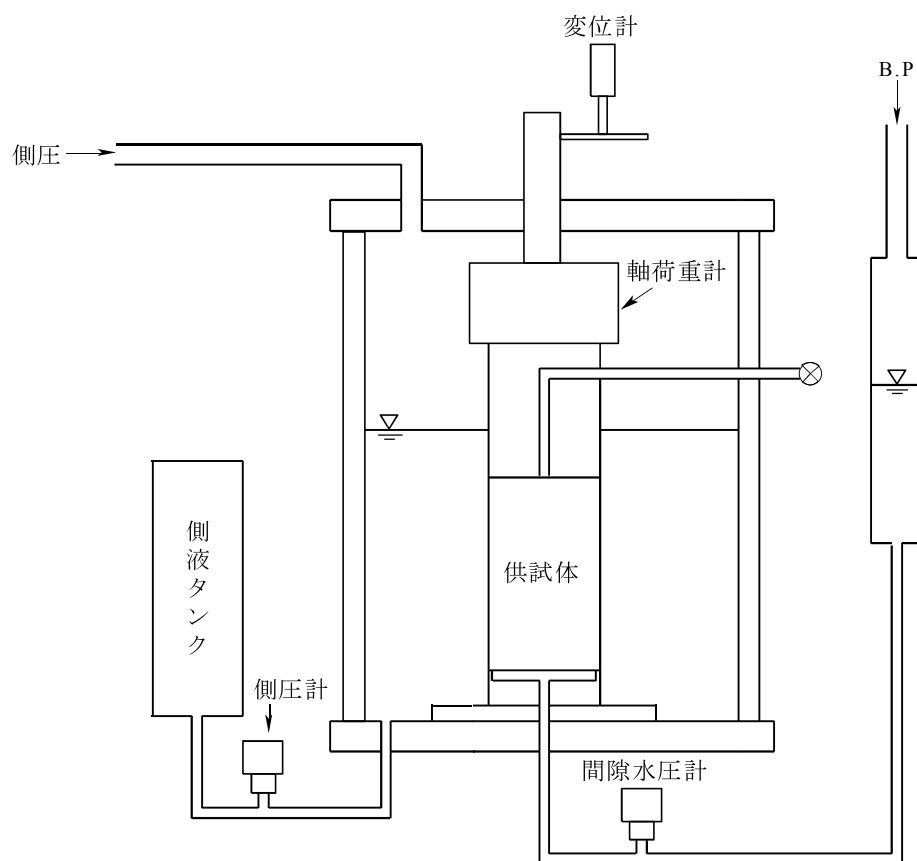


図 2.2.2 三軸圧縮試験機の配管系統図

表 2.2.2 各計測機器の概要

計測器	方式	機種	最大値
軸荷重計	ストレインゲージ式	TCLZ-100KA	100kgf
側圧計	ストレインゲージ式	PW-10	1MPa
間隙水圧計	ストレインゲージ式	PW-10	1MPa
軸変位計	ストレインゲージ式	CDP-50	50mm

単調三軸圧縮試験の試験方法は以下の通りである。

- 1) タイヤチップ単体試料の供試体作製方法は突固め(押固め)法を用いた。タイヤチップ試料は平均粒径 0.15mm 程度で、非常に細かく軽量であることから供試体作製段階で試料が飛散してしまうので押固めることによって作成した。
- 2) 供試体を作製後、負圧 10kPa を負荷し供試体を自立させる。このときに供試体の寸法を測定する。
- 3) セル内に側液を入れ、負圧 10kPa を側圧 10kPa で置換を行う。
- 4) 炭酸ガスを 30 分程度供試体内に通した後、脱気水の通水を行う。
- 5) 通水終了後、バックプレッシャー200kPa を負荷した後、B 値検定を行い B 値が 0.95 以上の供試体を飽和供試体と見なした。
- 6) B 値検定終了後、所定の拘束圧で圧密を行う。
- 7) 10 時間以上かけて体積圧縮が収まるまで圧密を実施する。
- 8) 圧密終了後、排水条件もしくは非排水条件で単調せん断を行う。載荷速度は 0.1mm/min とした。制御方法はひずみ速度一定のひずみ制御である。
- 9) せん断終了は、軸ひずみが 20%に達した時とし、この後、せん断除荷試験を同じひずみ速度で実施した。
- 10) 試験終了後、供試体試料を炉乾燥させ、試料の乾燥重量を測定する。

2.2.3 非排水繰返しせん断試験

本研究において、非排水繰返しせん断試験を行った試験装置の配管系統を図 2.2.3 に示す。この試験機は空圧制御式の繰返し三軸試験装置である。

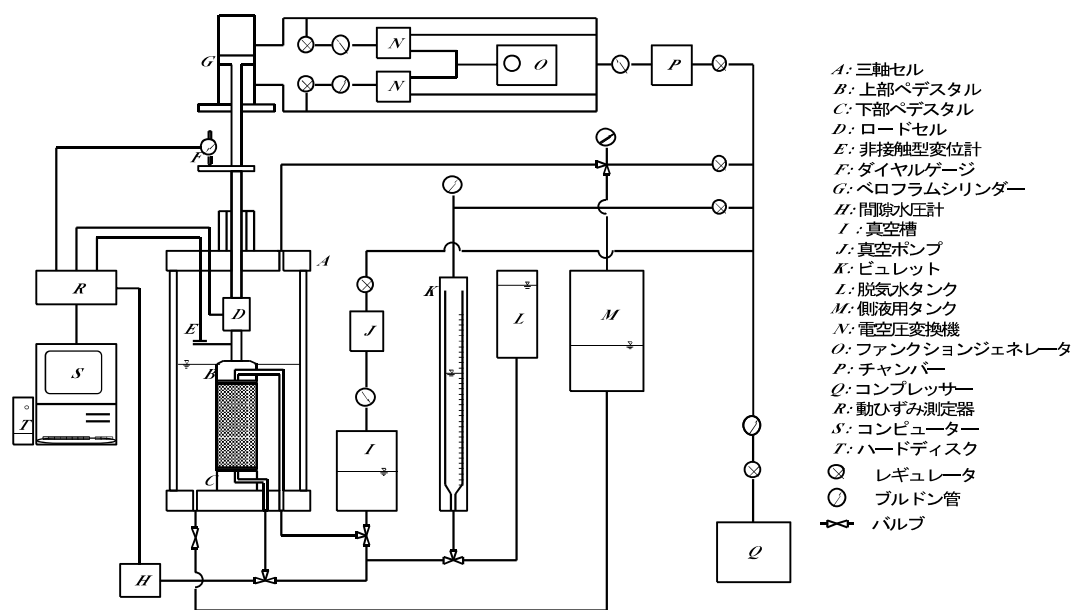


図 2.2.3 繰返し三軸圧縮試験機の配管系統図

この試験機の繰返し荷重システムは、ファンクションジェネレータで発生させた所定の正弦波電気信号を電空圧変換器によって正弦波空気圧に変換され、バイヤスリレーで上部と下部のバランスをとった後、ベロフラムシリンダー各室に伝えられピストンが上下する仕組みになっている。ここで、ファンクションジェネレータからの電気信号の位相を上部と下部の電空圧変換器で逆転させることにより、位相差 180 度の正弦波荷重を上部および下部のベロフラムシリンダーでそれぞれ独立して荷重する。このようにして発生した繰返し荷重は、荷重振幅一定のもと 0.001~0.5Hz の周波数で荷重可能である。また、本試験機の特徴を挙げると三軸セル内において供試体上方にロードセル（容量 Max.100kgf）を設置することにより、防水対策をせずに軸荷重を計測でき、軸変位は、三軸セル外部に設置した接触型変位計（容量 Max.50mm）で計測される。加えて、間隙水圧は供試体下端中央からポーラスストーンを介して三軸セル外部の間隙水圧計（容量 Max.5kgf/cm²）より計

測される。以上に述べた空圧制御式繰返し試験機を用い、荷重ならびに周波数を制御することにより荷重振幅一定のもとで繰返し載荷が行われ、計測値はコンピュータによって設定した間隔で取り込まれる。

非排水繰返しせん断試験の試験方法は以下の通りである。

- 1) 供試体作製方法は三軸圧縮試験と同様の方法で行う。
- 2) 供試体を作製後、負圧 10kPa を負荷し供試体を自立させる。
- 3) セル内に側液を入れ、負圧 10kPa を側圧 10kPa で置換を行う。
- 4) 炭酸ガスを 30 分程度供試体内に通した後、脱気水の通水を行う。
- 5) 通水終了後、バックプレッシャー 200kPa を負荷した後、B 値検定を行い B 値が 0.95 以上の供試体を飽和供試体と見なした。
- 6) B 値検定終了後、当節で設定した所定の拘束圧で圧密を行う。
- 7) 軸ひずみ・体積ひずみが一定になり、圧密開始から 30 分以上経過していれば圧密を終了する。
- 8) 圧密終了後、非排水条件で繰返しせん断を行う。載荷速度は正弦波で 0.1Hz とした。制御方法は荷重制御である。
- 9) せん断終了は、両振幅軸ひずみが 10%に達した時とした。
- 10) 試験終了後、供試体試料を炉乾燥させ、試料の乾燥重量を測定する。

2.2.4 中空ねじりせん断試験

図 2.2.4 は本研究で用いた油圧サーボ式中空ねじりせん断試験の概要を示したものである。本試験装置の基本的な構造は、他の多くの研究機関で用いられている試験装置同様、供試体上部からトルク力や軸荷重を載荷する仕組みになっている。表 2.2.3 に使用した計器と測定可能な容量および精度の一覧表を示す。

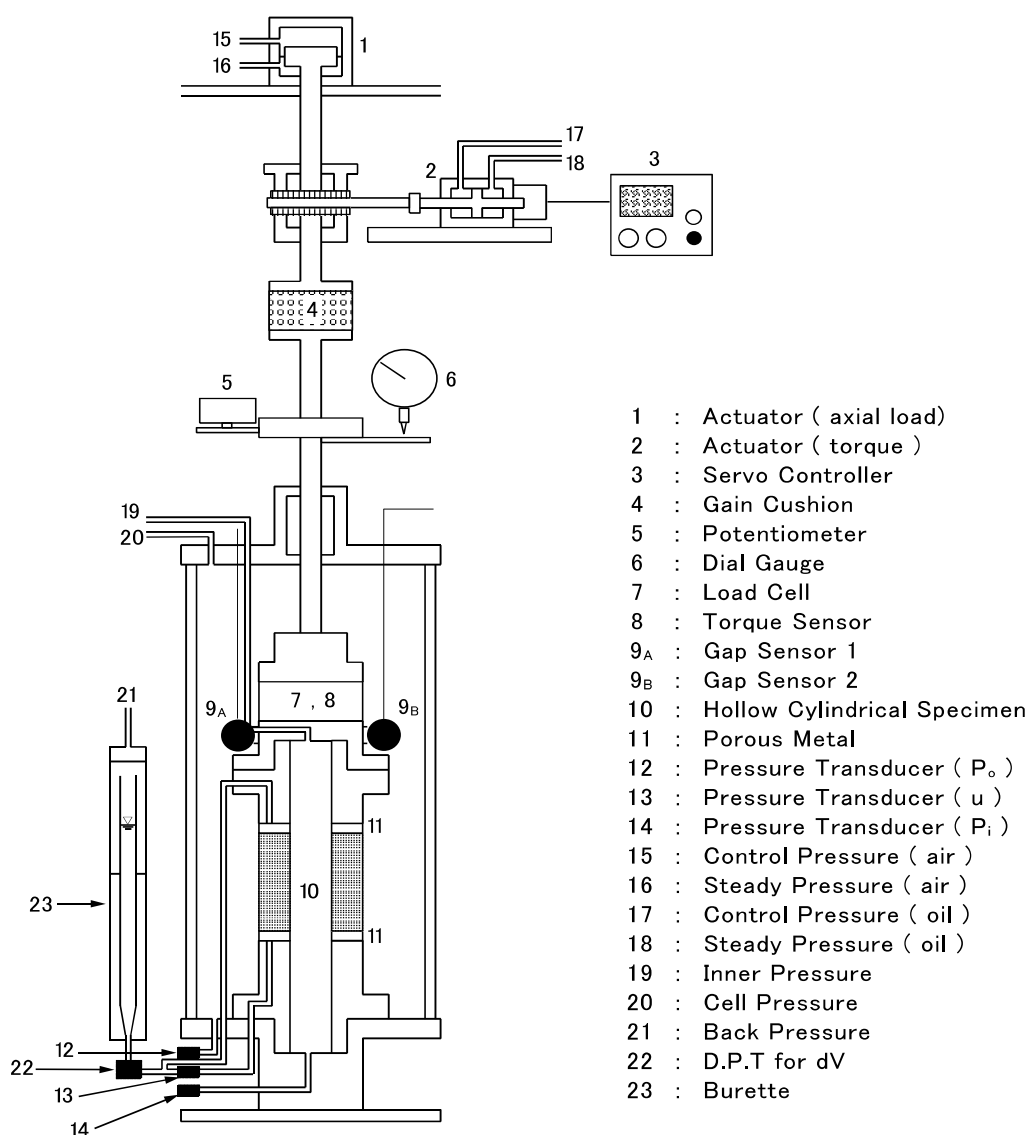


図 2.2.4 油圧サーボ式中空ねじりせん断試験装置の概略図

表 2.2.3 計測項目および装置とその能力

測定項目	測定計器	容量	精度
軸荷重	ロードセル	+2.0kN, -1.0kN	±0.5N
トルク力	トルク計	±20Nm	±1.0 × 10 ⁻³ Nm
内圧	水圧計	1.0MPa	0.2kPa
外圧	水圧計	1.0MPa	0.2kPa
背圧	水圧計	1.0MPa	0.2kPa
軸変位	変位計	20mm	0.01mm
ねじり変位	ポテンショメータ	±40°	±0.01°
	ギャップセンサ	±1°	±1.0 × 10 ⁻⁵ °
体積変化	差圧計	50ml	0.01ml

本研究ではせん断ひずみ 0.001%以下のせん断ひずみと、それに対応するせん断応力を計測するために、ギャップセンサおよびトルク計で検出される電気信号を増幅器でそれぞれ最大 25 倍および最大 5 倍に増幅することにより計測の精度を上げる工夫をしている。A/D 変換機を用いて電気信号をデジタル化し、コンピュータでデータを毎秒 37 回の速度で記録している(図 2.2.5 参照)。ねじり変位は最小で 0.00001° (高さ 10cm・外径 10cm・内径 6cm の供試体でのせん断ひずみ約 7.0 × 10⁻⁶%), トルク力は最小で 0.001Nm (高さ 10cm・外径 10cm・内径 6cm の供試体でのせん断応力約 0.005kPa) を計測することが可能である^{3),4)}。

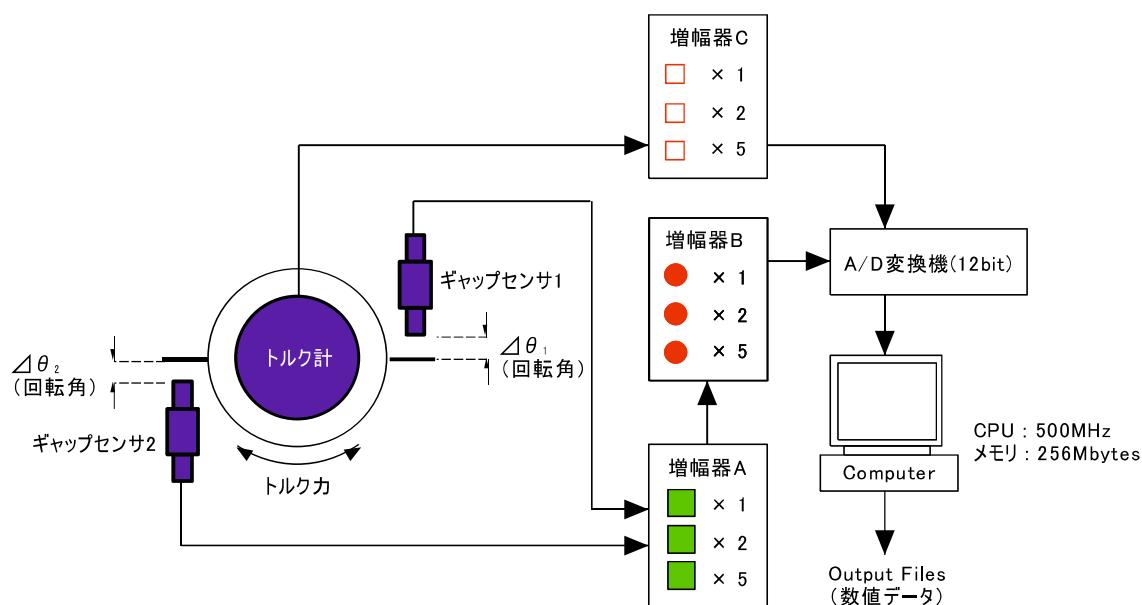


図 2.2.5 微小なねじり変位およびトルク力の計測

本研究では、非排水条件で軸変位を生じさせない単純せん断状態で、動的変形試験を行った。また、荷重制御で繰返し荷重の波形には正弦波を用いた。以下に試験方法を示す。

- ① 油圧シリンダーと試験装置を接続し、ファンクションジェネレータで載荷荷重の波形、周波数を設定する
- ② 1回目の繰返し載荷では、片振幅せん断ひずみ γ_{SA} が 0.001%以下となるように載荷可能な最も小さいトルク力を設定する。2回目以降の繰返し載荷では、片振幅せん断ひずみ γ_{SA} が前回の載荷の2倍程度になるようなトルク力を設定する。
- ③ 排水コックを閉じて供試体内部を非排水状態にする。試験装置の軸を固定する。ギャップセンサまたはポテンシオメータを初期化する。ねじり変位の計測は、片振幅せん断ひずみ 0.5%以下ではギャップセンサを用い、それ以降ではポテンシオメータを用いて計測する。
- ④ 1回の繰返し載荷で11サイクルの繰返し荷重を載荷した後、排水コックを開き過剰間隙水圧を消散させる。繰返し載荷中に、ギャップセンサ1・2またはポテンシオメータで計測したねじり変位および、トルク力、供試体の内半径、外半径、高さ、体積、間隙水圧、外圧(=内圧)、軸荷重の10項目をコンピュータで每秒約37回(1サイクルで約370回)記録している。
- ⑤ しばらく放置した後、過剰間隙水圧が消散したことを確認し、片振幅せん断ひずみ γ_{SA} が 1.0%以上になるまで②～④を繰り返す。

2.3 タイヤチップの圧縮およびせん断特性

2.3.1 圧密排水せん断(CD)試験, 圧密非排水せん断(CU)試験およびせん断除荷試験の結果

図 2.3.1 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, 図 2.3.2 に体積ひずみ-軸ひずみ関係を示す. タイヤチップの材料であるゴムのポアソン比が 0.5 で, 非圧縮性であることよりタイヤチップの粒子そのものも伸縮するが体積変化がないことから⁵⁾, 体積ひずみは供試体から出入りする排水量から求めている.

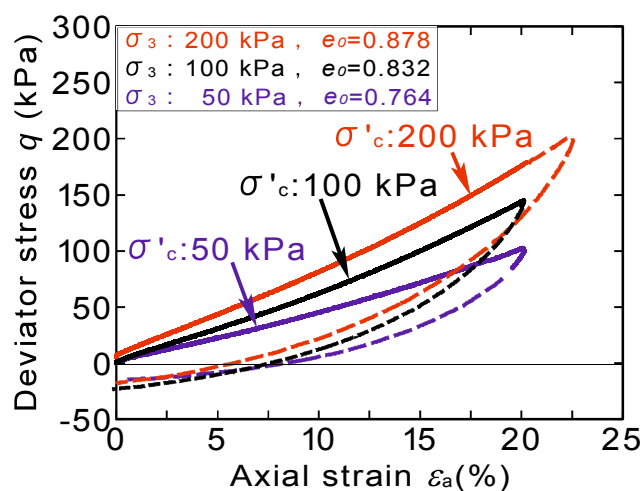


図 2.3.1 排水単調せん断試験 軸差応力-軸ひずみ関係

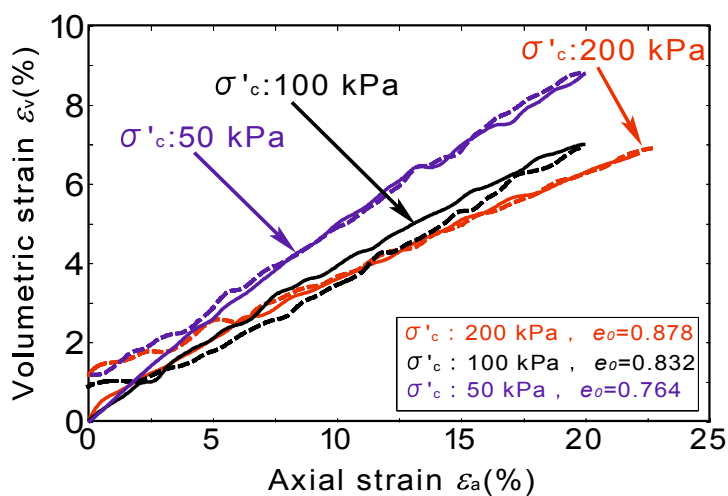


図 2.3.2 排水単調せん断試験 体積ひずみ-軸ひずみ関係

実験は有効拘束圧 $\sigma'_c=50, 100, 200\text{kPa}$ において実施し、試料の圧密前の初期間隙比は、それぞれ、図中に示す通りである。これらの違いは、供試体作製時のばらつきによるものである。なお、図中実線は載荷時を、破線は除荷時を示す。図より、い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呈し、終始弾性的挙動で破壊の兆候は見られない。また、体積変化は圧縮側に線形的に増加している様子が見て取れる。矢島ら^{2),5)}も、タイヤチップのサイズが、2mm, 6mm で同様な側圧一定せん断試験を実施しているが、軸差応力-軸ひずみ関係のグラフは、ひずみ硬化型ではあるが、穏やかな定常状態に至るようなカーブになっており、逆反りにはならず異なったグラフ形状になっている。このグラフ形状の違いは、供試体作製時の締固め密度の違いに起因するものと推測し、著者らの作製した供試体密度の方が高い状態であった。またこの逆反り形状は、側圧一定せん断載荷による平均主応力の増加によるものであることを、後述の平均主応力一定試験と側圧一定試験の軸差応力-軸ひずみ関係である図 2.2.9(a)からも見て取れるが、基本的には線形弾性的挙動を示している。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、除荷時における $q=0$ の時、塑性軸ひずみを、有効拘束圧 $\sigma'_c=50, 100\text{kPa}$ では約 7.5%、有効拘束圧 $\sigma'_c=200\text{kPa}$ では約 5.0%残すが、この事象は供試体作成時に有効拘束圧 $\sigma'_c=200\text{kPa}$ の場合の供試体の初期間隙比が他より大きくなっていることによるものと考えられる。一方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。しかし、軸ひずみ $\varepsilon_a=0$ まで除荷しても、体積ひずみは完全に 0 に戻らず、体積ひずみは若干残留していることが見て取れる。これより、体積ひずみのほとんどは、粒子の再配列を伴うダイレイタンスによるものではなく、タイヤチップ粒子の伸びによるものであるが、この残留体積ひずみ分は粒子移動に起因するものと考えられる。

図2.3.3は側圧一定非排水単調せん断による軸差応力-軸ひずみ関係を示す。図中実線は載荷時を、破線は除荷時を示す。有効拘束圧、試料の圧密前の初期間隙比は、それぞれ、図中に示す通りである。いずれの拘束圧においても排水条件時と同様、ピークは現れず線形的挙動を示し、図2.2.6の排水試験時のような逆反りのひずみ硬化傾向は呈さない。これは、非排水条件下に

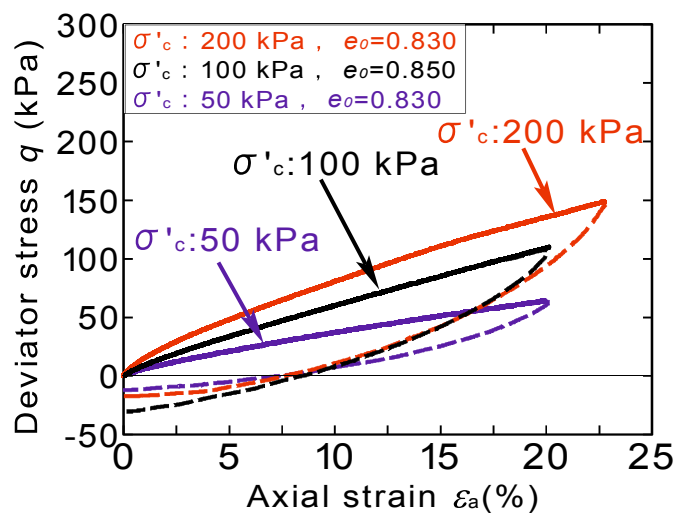
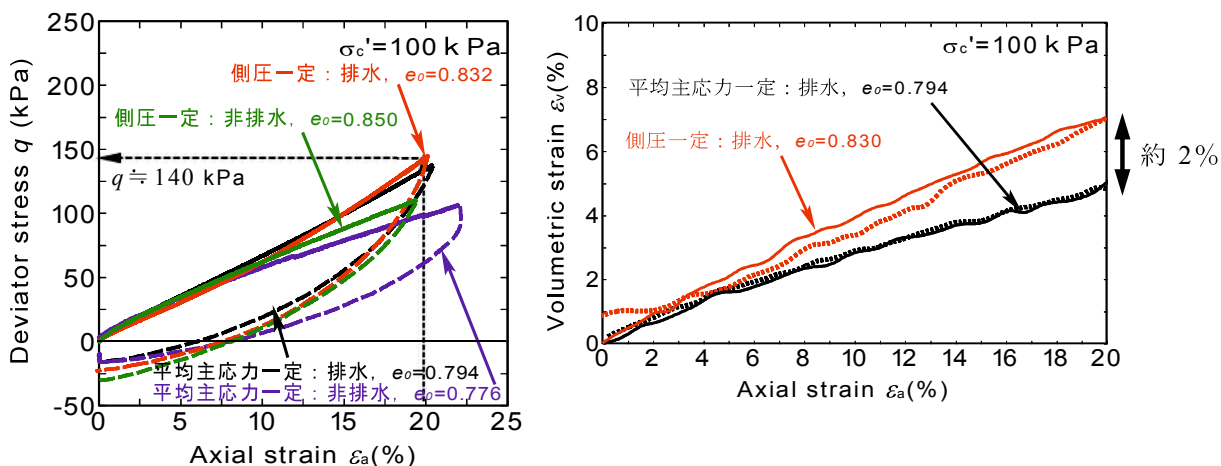


図 2.3.3 非排水単調せん断試験 軸差応力－軸ひずみ関係

おけるせん断载荷により、ある程度の過剰間隙水圧が発生し有効応力が低下したことによると考えられる。これは次に述べる図 2.2.9(c)に示す有効応力経路からも、過剰間隙水圧が発生した分、有効応力が減少していることが読取れることから推測できる。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。

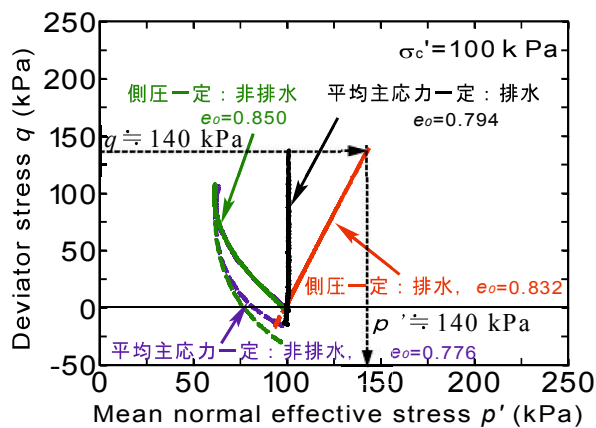
2.3.2 平均主応力一定せん断試験と等方圧縮除荷試験の結果

図 2.3.4(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、図 2.3.4(b)に体積変化を、図 2.3.4(c)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示している。



(a)軸差応力-軸ひずみ関係

(b)せん断載荷時および除荷時
体積ひずみ-軸ひずみ関係



(c)有効応力経路

図 2.3.4 平均主応力一定試験結果と側圧一定試験結果

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 2.3.5 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。試料の初期間隙比および乾燥密度は、 $e_0 = 1.040$

($\rho_d=0.577 \text{ g/cm}^3$) であった. なお, 図 2.3.4, 図 2.3.5 において実線は載荷時を, 破線は除荷時を示す.

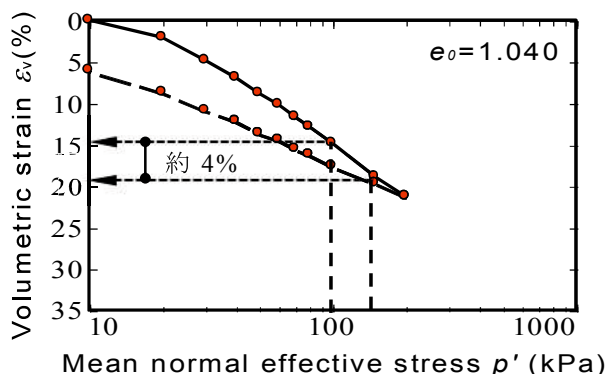


図 2.3.5 等方圧縮除荷試験結果

図 2.3.4(a), (b)より, 平均主応力一定と側圧一定せん断試験の排水, 非排水いずれの条件においても, 載荷時は $\varepsilon_a=20\%$ に至っても軸差応力および軸ひずみは線形的増加傾向を示すだけで破壊に至る兆候は見られない. そして排水試験では, 体積変化も圧縮側にほぼ直線的な増加傾向を呈している. また, 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 $\varepsilon_a=20\%$ の時点において, 体積変化の差が約 2%であるのに対し, $\varepsilon_a=20\%$ 時点での側圧一定せん断試験における平均主応力 p' を図 2.3.4(a)-(c)から読み取ると $p'=140\text{kPa}$ となり, 図 2.3.5 の等方応力載荷試験結果より, 平均有効主応力 100kPa と 140kPa の体積ひずみ差が約 4%と読取れ, 等方圧縮による体積変化は, せん断による体積変化の約 2 倍の差があった. ただし, 図 2.3.4(b)と図 2.3.5 の各試験の初期間隙比 e_0 が異なっており, 等方圧縮除荷試験の方がタイヤチップはゆる詰めになっており, 等方応力載荷の方が体積ひずみは大きくなるとは言い切れない. また, 図 2.3.4(b)より, 側圧一定排水試験ではせん断除荷時に若干残留していた体積ひずみが, 平均主応力一定排水試験ではほぼ元の 0 に戻ることから, せん断力のみにより生じる体積ひずみはダイレイタンシーによるものではないと判断され, 側圧一定排水試験時の残留体積ひずみは平均主応力増分に伴うタイヤチップ粒子移動によるものと推測する. さらに, 図 2.3.4(c)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、せん断載荷時に間隙水圧が発生するが、せん断除荷時にはこの間隙水圧も消滅し残留しないことから、非排水せん断による間隙水圧発生も排水せん断時の弾性的な体積ひずみの発生と対応するものと考えられる。以上のことから、タイヤチップのせん断載荷による体積変化は、そのほとんどが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。ただし、図 2.3.4(b)に示す側圧一定排水せん断除荷時に、わずかに生じている残留体積ひずみは、主な骨格構造をなさない細かなサイズの粒子の移動に起因するものと推測する。また、図 2.3.4(b)と図 2.3.5 より、タイヤチップの体積変化には、せん断載荷除荷のみの場合はほとんど元の 0 に戻るが、等方応力成分も付加された載荷や等方圧縮除荷という等方応力成分のみの載荷の場合には、数%ではあるが、残留体積ひずみが生じるという載荷の違いによる特性があることも確認できる。

2.3.3 非排水繰返しせん断特性

図2.3.6は、飽和供試体に対し有効拘束圧 $\sigma'_c=100\text{kPa}$ 、載荷周波数 0.1Hz で行った非排水繰返し三軸試験結果の一例を示すものであり、(a)、(b)、(c)はそれぞれ軸差応力-軸ひずみ関係、有効応力経路、間隙水圧時刻歴を示す。なお、供試体の圧密前の初期間隙比は、図に示す通りである。

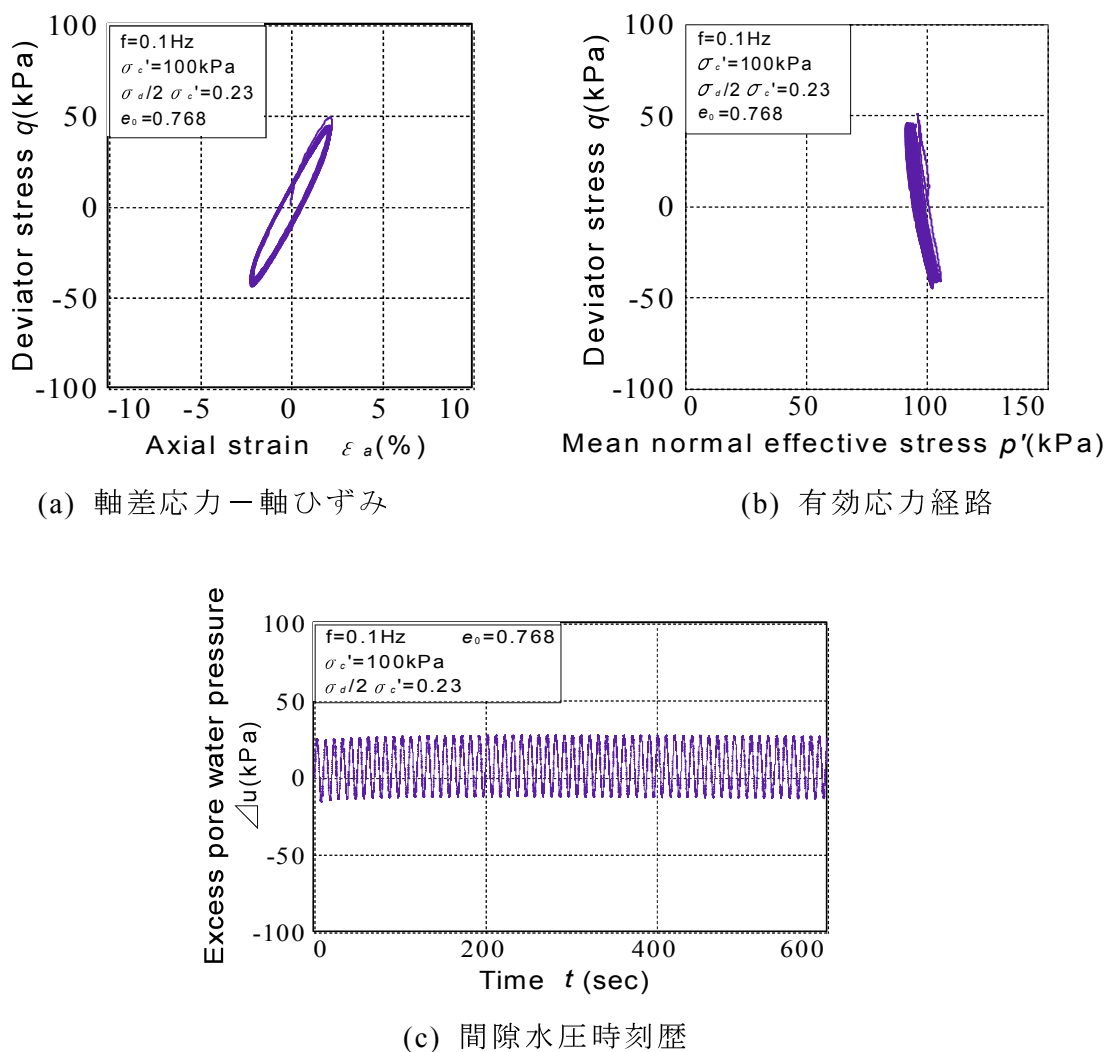


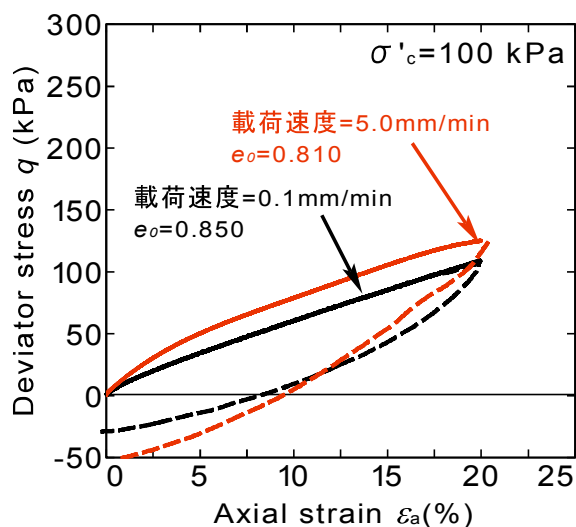
図 2.3.6 非排水繰返し三軸試験結果

図2.3.6(a)より、軸ひずみ ε_a はタイヤチップの剛性が低いことから、載荷初期から大きく発生し、1サイクルで両振幅ひずみが $DA=5\%$ に達してしまい、その後の繰返しせん断によっても発達することはなく同じヒステリシスル

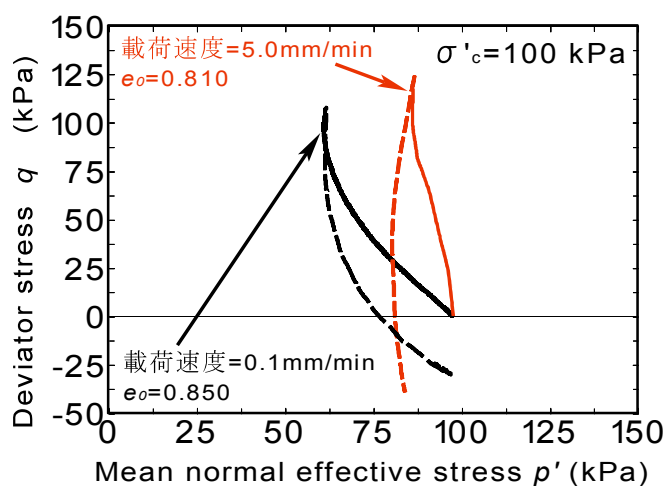
ープを描いていることが認められる。また図2.3.6(b)より、繰返しせん断により有効応力が1割程度減少し間隙水圧が増加していることも見て取れる。これらの事象は、図2.3.6(c)の間隙水圧の時刻歴にも反映され、間隙水圧は、初期の载荷で、 $\Delta u=20\text{kPa}$ 程度となり、その後繰返し回数が増加してもその波形は、ほとんど一定の振幅を保ち、上昇することはないことから、液状化に至ることはないと判断される。

2.3.4 载荷速度の影響

一連の単調および繰返し三軸試験を実施した結果を比較すると、载荷せん断速度の違いにより剛性の大きさや間隙水圧の発達に差が生じていることがわかる。両試験では载荷の仕方が、単調せん断試験ではひずみ速度一定であり、繰返し試験は周波数を一定とした正弦波による応力制御と異なるので、繰返しせん断試験の初期载荷部分と単調せん断試験結果を比較した図2.3.6(a)より、繰返し三軸試験による1サイクル目の軸ひずみ $\varepsilon_a=2.5\%$ に相当する軸差応力は $q=50\text{kPa}$ であるのに対し、図2.3.3より、非排水単調せん断試験では、 $\varepsilon_a=2.5\%$ に相当する軸差応力は $q=13\text{kPa}$ であり、両者の剛性に違いがあることが確認できる。また、有効応力経路の違いも認められる。図2.3.4(c)と図2.3.6(b)を比較すると、非排水単調せん断試験では、有効応力が4割程度低下しているのに対し、非排水繰返し三軸試験では、1割程度しか低下してない。これらの事象より、タイヤチップにはひずみ速度依存性があることが認められる。そこで非排水単調せん断試験において、有効拘束圧 $\sigma'_c=100\text{kPa}$ 、軸ひずみ速度を 0.1mm/min と 5.0mm/min の2種類で载荷および除荷試験を行った。なお、供試体の圧密前の初期間隙比および乾燥密度は、前者が $e_0=0.850(\rho_d=0.637\text{g/cm}^3)$ 、後者が $e_0=0.810(\rho_d=0.650\text{g/cm}^3)$ であった。図2.3.7にその結果を示す。図中実線は载荷時を、破線は除荷時を示す。図2.3.7(a)は、ひずみ速度の違いによる軸差応力-軸ひずみ関係の違いを示しているが、この図より、やはりひずみ速度が大きい程、軸差応力が大きくなることが認められる。また、図2.3.7(b)は、ひずみ速度の違いによる有効応力経路の違いを示しているが、载荷終了時($\varepsilon_a=20\%$ 時)にひずみ速度が大きい後者の方は、有効応力低下が1割程度であるのに対し、ひずみ速度の小さ



(a) 軸差応力－軸ひずみ関係



(b) 速度依存性確認試験結果

図 2.3.7 速度依存性確認試験結果

い前者では、4割程度の有効応力低下が確認でき、有効応力低下（過剰間隙水圧発生）が、繰返し三軸試験では生じ難いが単調三軸試験では生じ易い事象と合致する。ちなみに、繰返し三軸試験の1サイクル目の軸ひずみ速度は、約60.0 mm/minに相当する。以上の結果を勘案すると、タイヤチップには、ひずみ速度依存性があることが確認でき、地震時のようにせん断ひずみ速度の大きい場合には間隙水圧の発生量は小さく、残留もないことが推測される。

この載荷速度の影響を受ける事象が生じる理由は、集合体としてのタイヤ

チップ粒子の変形やすべり（転位・移動）には、時間を要する（時間依存性がある）為、載荷速度が大きい程、タイヤチップ粒子の変形やすべりによる体積変化が生じ難くなり、よりタイヤチップの粘弾性的な挙動特性が卓越することにより、有効応力が低下せず剛性が下がらない（ひいては上がる）ことによるものと考察する。また、中空ねじりせん断試験結果より求めた、有効拘束圧 $\sigma'_c=50\text{kPa}$ 時（住宅基礎下2m位置のタイヤチップ敷設を勘案して）の初期せん断弾性係数 $G_0^{(1)}$ と位体積重量 ρ から、せん断波速度 V_s を算出すると約6.7m/sとなり極めて小さく、この事もタイヤチップ粒子変形の時間依存性が寄与しているものと推測する。その他、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（図2.3.1）よりタイヤチップ集合体のポアソン比 ν を求めると、 $\nu=0.25$ と小さな値になり加力方向の圧縮変形が卓越するイメージとなる。この事もタイヤチップがせん断変形に伴う体積変化を生じ難いものとしている要因であると考えられる。

2.3.5 タイヤチップ粒状集合体の圧縮・せん断変形のメカニズムの考察

前項までの粒径 0.5mm 以下のタイヤチップの実験結果ならびに既往の研究, さらに粒径 2.0mm 以下のタイヤチップに関して側圧一定排水単調せん断試験 (載荷→除荷) を実施した結果を勘案して, タイヤチップ粒状集合体の排水せん断挙動を考察してみた. 図 2.3.8 は粒径 2.0mm 以下と 0.5mm 以下のタイヤチップの粒度分布を, 図 2.3.9 は粒径 2.0mm 以下タイヤチップの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. 図中色入りドットが載荷時を, 色抜きドットが除荷時を示し, 実験は, 有効拘束圧 $\sigma'_c=50, 100, 200\text{kPa}$ において実施した結果である. なお, 除荷は軸ひずみが 0 になるまで実施しており, 引張力も掛けている.

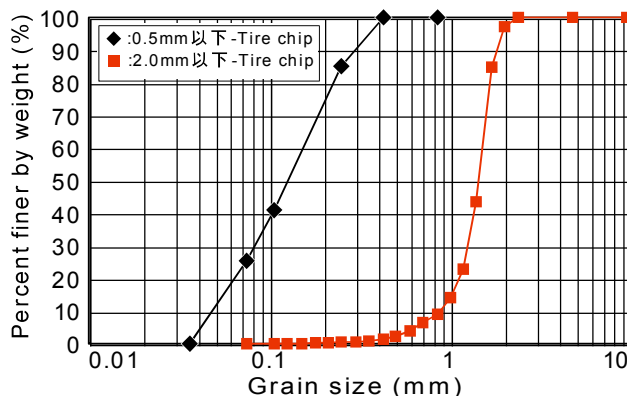


図 2.3.8 粒径 0.5mm 以下と粒径 2.0mm 以下のタイヤチップの粒度分布

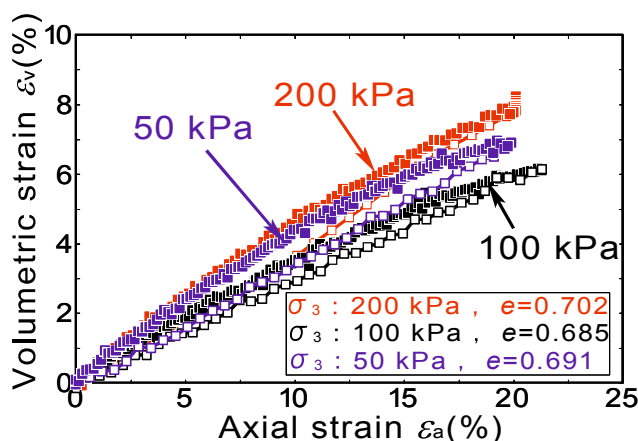


図 2.3.9 粒径 2.0mm 以下タイヤチップの排水単調せん断試験結果 (載荷→除荷) 体積ひずみ-軸ひずみ関係

図 2.3.8 と図 2.3.9 より，0.5mm 以下の場合と異なり均一な粒度分布試料である粒径 2.0mm 以下タイヤチップの場合，除荷するとほぼ 0 に戻っている事や，粒度分布に幅がある 0.5mm 以下のタイヤチップの場合でも，既述の通り，側圧一定排水単調せん断試験では残留体積ひずみがある（図 2.3.2）が，平均主応力一定排水単調せん断試験の場合（図 2.3.4(b)）は，残留体積ひずみが生じないことを勘案すると，そのメカニズム模式図を図 2.3.10 のように考察してみた。

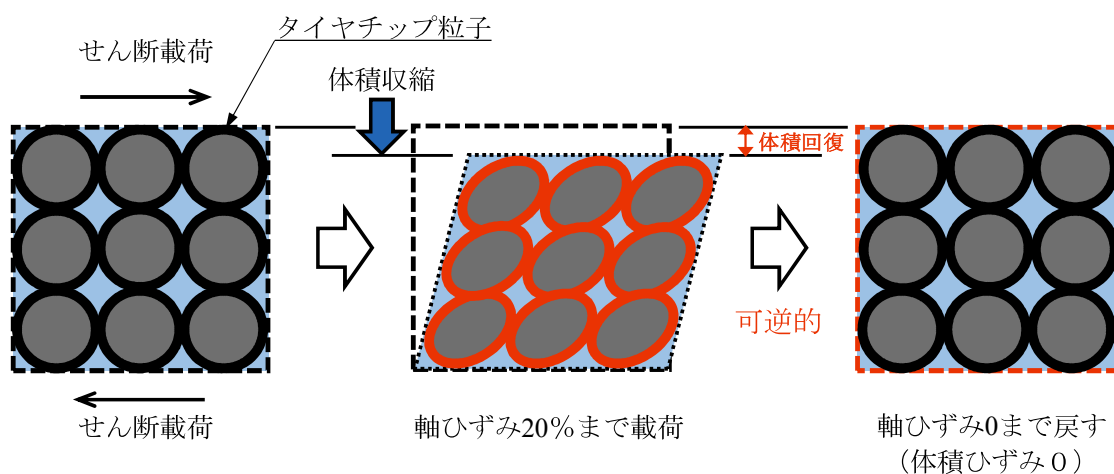


図 2.3.10 タイヤチップ粒状集合体の排水せん断挙動の模式図

島田ら^{6),7),8)}は，X線CTによるタイヤチップの一面せん断挙動のPIV解析により，タイヤチップは，粒子の圧縮・変形作用によってほとんど体積膨張を生じることなく，せん断変形しており，弾性体であるタイヤチップは作用する力が周辺粒子に伝達され小さなひずみが広範囲に広がっており，粒子移動はほとんど生じていないとしている．今回の研究においても，排水条件下の平均主応力一定試験によるせん断载荷時および除荷時の体積ひずみ関係結果（図 2.3.4(b)）より，载荷後除荷した場合体積ひずみは，ほとんど元の 0 に戻っていることを確認した．これより，タイヤチップ粒子は土粒子とは異なり，せん断力のみが作用した場合は，その接触面においてすべりや転位といった粒子移動による塑性的な変形はせず，弾性変形のみが生じているものと推測する．

2.4 不均一住宅荷重に対するタイヤチップ改良地盤の変形の変形の検証

住宅の不同沈下に伴う傾斜の限度（閾値）について、日本建築学会「小規模建築物基礎設計指針」に表 2.4.1 に示す傾斜角が目安として掲載されている。この傾斜角は、居住者に不都合が発生する場合と住宅の構造上の不都合が発生する場合の双方を勘案しその値が規定されている。住宅の品質確保の

表 2.4.1 住宅の傾斜の限度⁹⁾

傾斜角	障害の程度	レベル
3/1 000 以下	品確法技術的基準レベル-1 相当	1
4/1 000	不具合がみられる	2
5/1 000	不同沈下を意識する 水はけが悪くなる	
6/1 000	品確法技術的基準レベル-3 相当 不同沈下を強く意識し、申し立てが急増する	3
7/1 000	建具が自然に動くのが顕著にみられる	
8/1 000	ほとんどの建物で建具が自然に動く	4
10/1 000	排水管の逆勾配	
17/1 000	生理的な限界	5

促進等に関する法律（品確法）で「住宅紛争処理の参考となるべき技術的基準」（平成 12 年 7 月，国土交通省）によると，施工誤差の範囲として勾配（凹凸）の少ない仕上げによる壁または柱の表面と，その面と垂直な鉛直面との交差する線（2m 程度以上の長さのものに限る）の鉛直線に対する角度が 3/1000 未満としている。また，この施工誤差の範囲と経年変化の範囲を加えて，6/1000 未満までは欠陥の範囲ではないとしている。従って，ゴルフボールが転がるといわれる 6/1000 以上の傾斜を欠陥範囲として，これ以下の傾斜では許容範囲といえる。

本研究において対象としている建築物は，先の東日本大震災にて液状化に伴う不同沈下で甚大な被害がクローズアップされた戸建住宅 2~3 階建てであり，ビル等の一般建築物に比べ軽量である。しかし軽量ではあるが 3 階建てで，一部 1 階や 2 階建てといった構造も多く，基礎スラブ下にかかる住宅

荷重は不均一である。本研究で提案しているタイヤチップ地盤改良は、地盤の剛性をあえて低く置換している。このことによる鉛直方向（Z方向）の卓越振動数の低振動数領域へ移行するなどの影響は、第3章3.5節の1G場振動台模型実験で確認した。この戸建住宅の不均一荷重が、提案しているタイヤチップ改良地盤にかかった際の、静的荷重によって既に上述の傾斜限度を超えてしまえば、そもそもこの提案技術が成り立たないため、有限要素法による2次元平面ひずみ弾性解析を実施し検証を行った。なお、タイヤチップに関する解析パラメータであるヤング係数やポアソン比は、本章P30に示す図2.3.1より求めている。

2.4.1 解析条件と解析モデル

地盤モデルの対象地盤は、液状化に伴う戸建住宅の沈下傾斜の等の被害が甚大であった浦安を想定し、浦安市液状化対策技術検討調査委員会の第3回浦安市液状化対策技術検討調査会資料¹⁰⁾の地盤モデルを参考に解析パラメータ（地盤物性値）を表2.4.2のように設定した。

表 2.4.2 解析パラメータ

モデル地盤各層	層厚 (m)	単位体積重量 (kN/m ³)	S波速度 (m/s)	せん断剛性 (kN/m ²)	ヤング係数 (N/m ²)	ポアソン比
コンクリートスラブ ^a	0.25	24.00	—	—	1.00×10^{14} ※ ₁	0.20
タイヤチップ ^b	0.50	11.56	—	—	4.30×10^5 ※ ₂	0.25 ※ ₃
Bs	1.00	17.00	93	14993	3.99×10^7	0.33
Fs	2.00	18.00	93	15875	4.22×10^7	0.33
Fs	3.40	18.00	100	18355	4.88×10^7	0.33
As1	6.70	18.00	124	28222	7.51×10^7	0.33
Ac1	17.30	16.00	133	28860	7.68×10^7	0.33
As2	1.35	18.00	161	47578	1.27×10^8	0.33
Nac	4.05	17.00	190	62580	1.81×10^8	0.45
Nac	4.00	17.00	289	144785	4.2×10^8	0.45
Nac	8.40	17.00	188	61269	1.78×10^8	0.45
Nas	1.55	18.00	388	276322	8.01×10^8	0.45

※₁: 2.66×10^{10} (N/m²)が本当のヤング係数であるが、計算上剛体と見なす為の値

※₂: P30 図2.3.1中の $\sigma'_c = 50$ kPaの $\epsilon_a = 10\%$ 時より算出

※₃: $v = \frac{1}{2} \left\{ 1 - \frac{\epsilon_v \cdot E}{4q} \right\}$ or $v = \frac{1}{2} \left\{ 1 - \frac{\epsilon_v \cdot E}{34p'} \right\}$ にて算出

図2.4.1は、地盤モデルを、図2.4.2～図2.4.4は、タイヤチップ改良地盤のモデルを示す。タイヤチップ改良地盤は、厚さ0.5mのタイヤチップ層を

GL-1.5m~-2.0mに敷設した場合をケース A, 厚さ 0.25m を 2 箇所に分けて GL-0.75m~-1.0mおよび GL-1.75m~-2.0mに敷設した場合をケース B, タイヤチップを土のうに入れ, GL-1.5m~-2.0mに敷設した場合をケース Cとしている. なお, ケース Cでは, タイヤチップを土のうに入れて配置することを想定し, タイヤチップ層を高さ 0.1m×幅 0.3mに区切り, 要素の水平方向への変形は拘束し, 鉛直方向は変形を許容するローラー支点としている. なお, 基礎スラブ長は 7m としている.

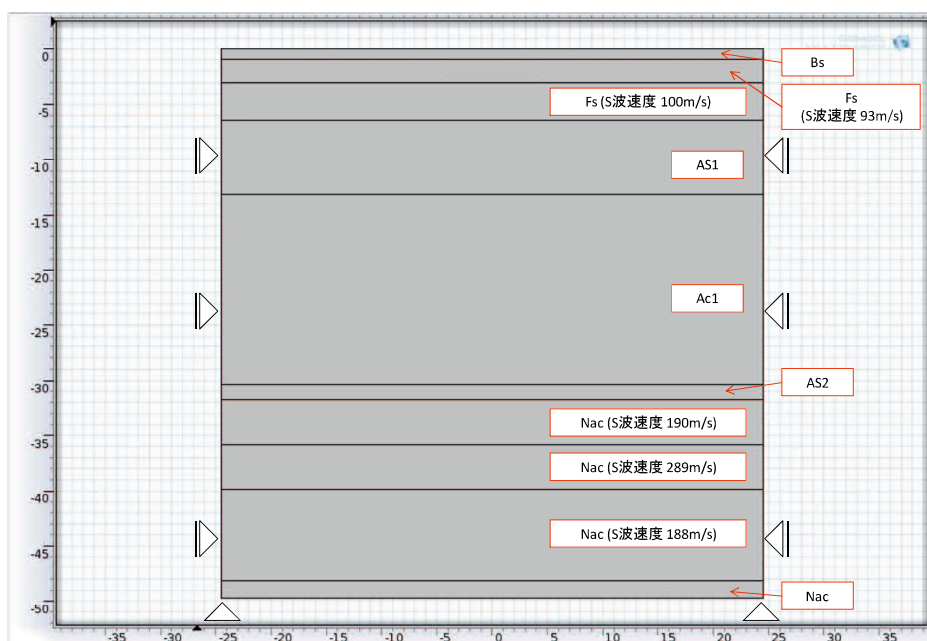


図 2.4.1 地盤モデル

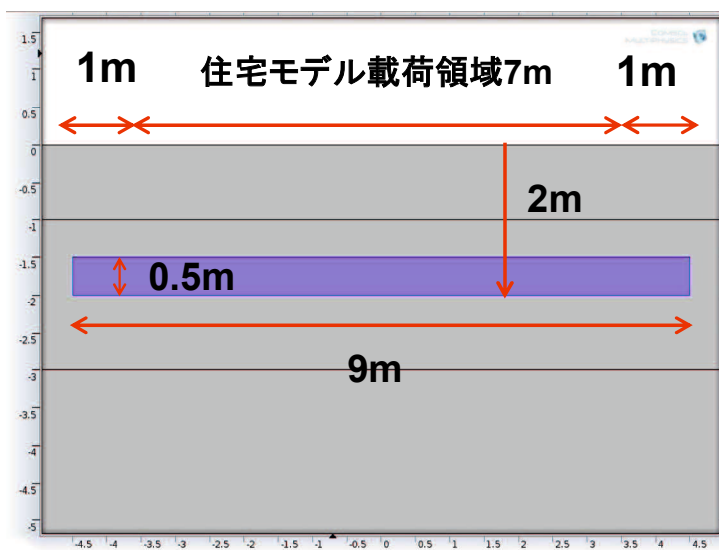


図 2.4.2 タイヤチップ地盤改良ケース A

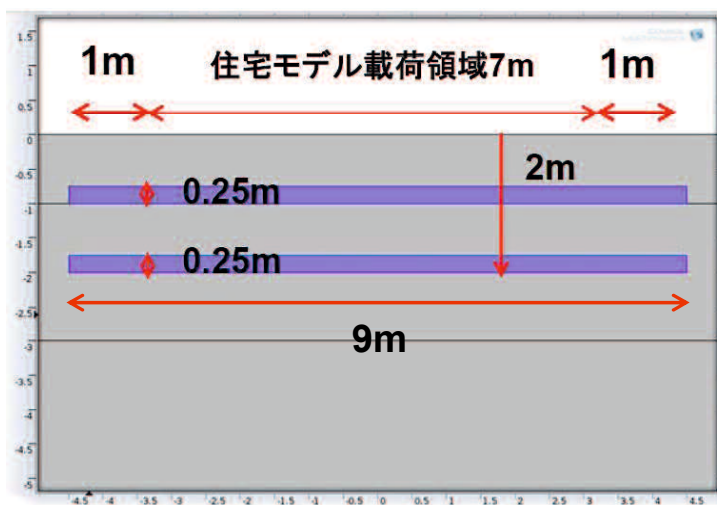


図 2.4.3 タイヤチップ地盤改良ケース B

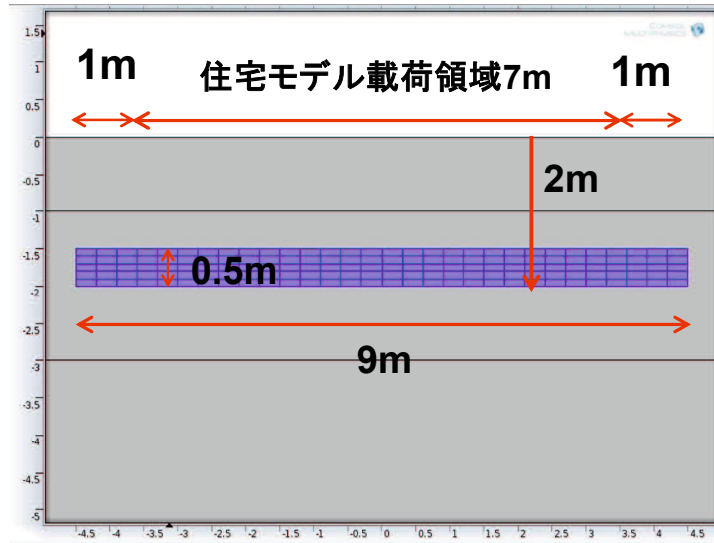


図 2.4.4 タイヤチップ地盤改良ケース C

2.4.2 解析結果と考察

住宅の不同沈下に伴う傾斜には、一体傾斜と基礎梁の損傷を伴う部分傾斜があるが、東日本大震災時もそうであったように、液状化被害時が生じ易い砂系地盤上の住宅被害の多くは、一体傾斜であるので、図 2.4.5 に示す一体傾斜での傾斜角で評価・検証した。また今回の検証評価は、その閾値を最も厳しい 3/1000 とした。

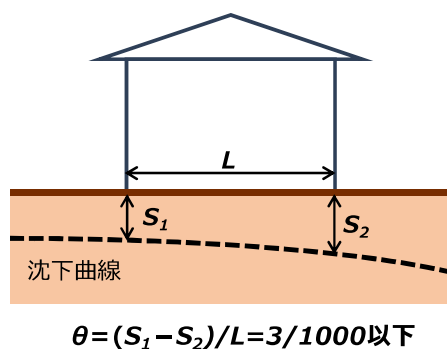


図 2.4.5 住宅傾斜の評価

住宅不均一荷重のモデルケースは、2階建て一部1階の場合を図 2.4.6 に、3階建て一部1階建ての場合を図 2.4.7 に、3階建て一部2階建ての場合を図 2.4.8 に示す。

一部平屋2階建て住宅モデル(木造・鉄骨対象)

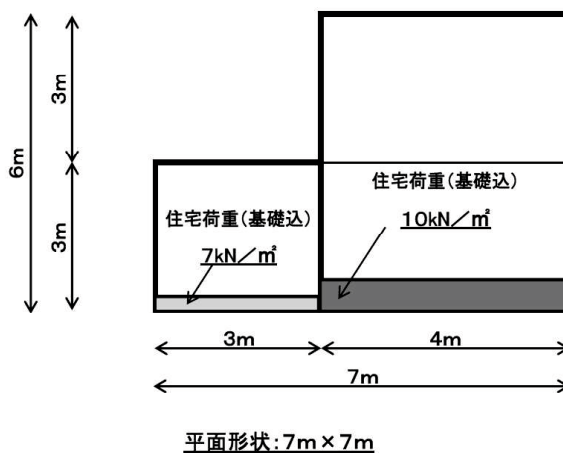


図 2.4.6 住宅荷重モデル 1

一部平屋3階建て住宅モデル(木造・鉄骨対象)

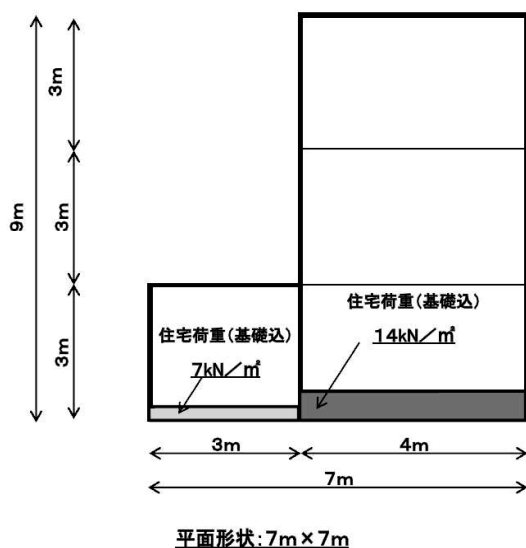


図 2.4.7 住宅荷重モデル 2

一部2階3階建て住宅モデル(木造・鉄骨対象)

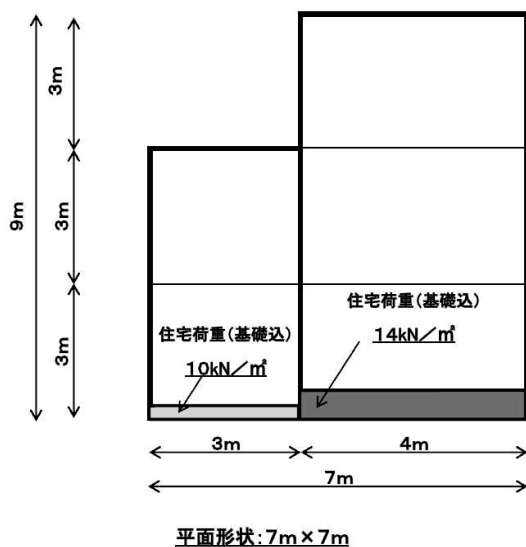
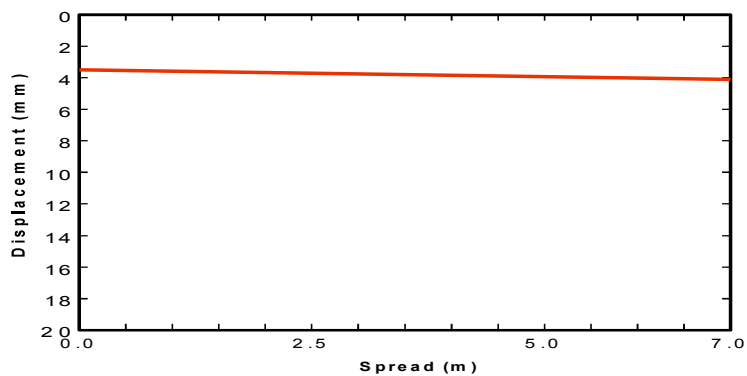


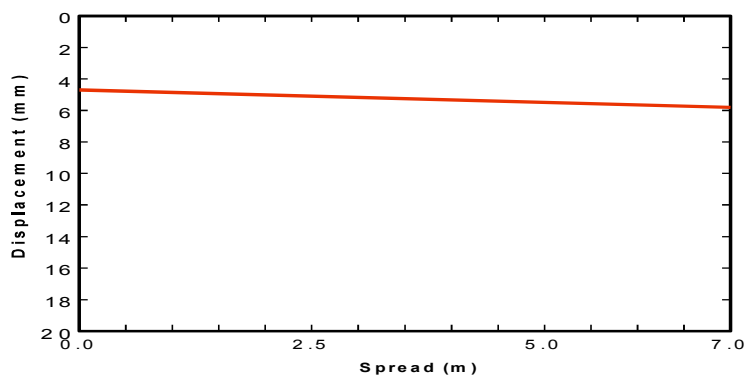
図 2.4.8 住宅荷重モデル 3

各住宅荷重モデルケースに対するタイヤチップ改良地盤の沈下傾斜の解析結果を図 2.4.9～付図 2.4.11 示す。また各ケースの傾斜最大値をまとめたものが、表 2.4.3 である。

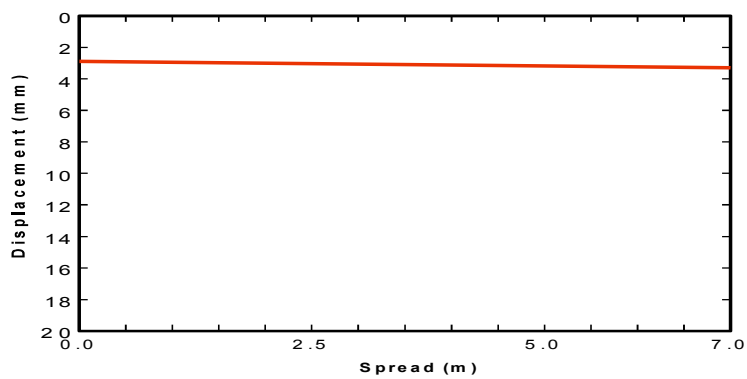
第2章 タイヤチップの力学特性



タイヤチップ地盤改良ケース A



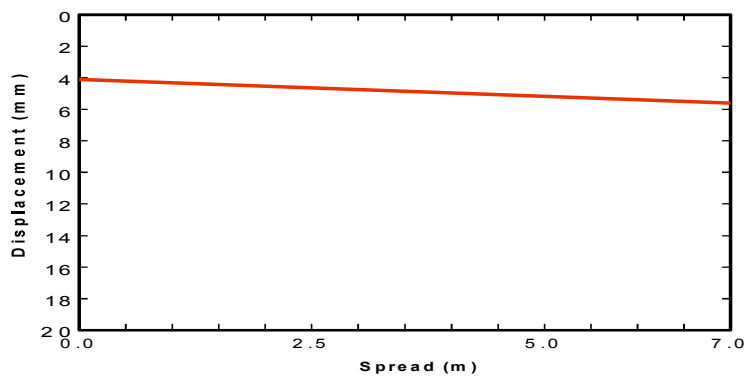
タイヤチップ地盤改良ケース B



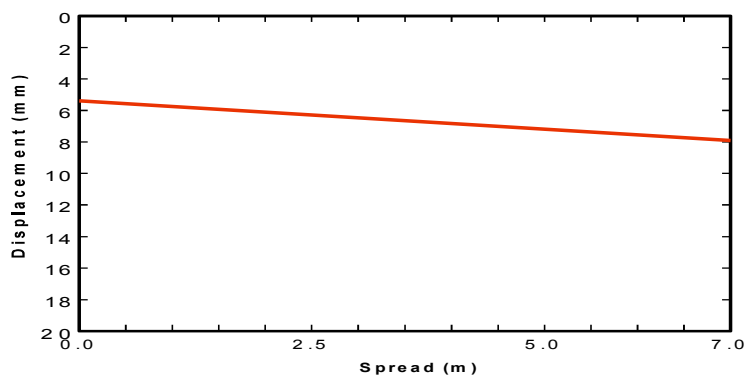
タイヤチップ地盤改良ケース C

図 2.4.9 住宅荷重モデル 1 に対する沈下傾斜解析結果

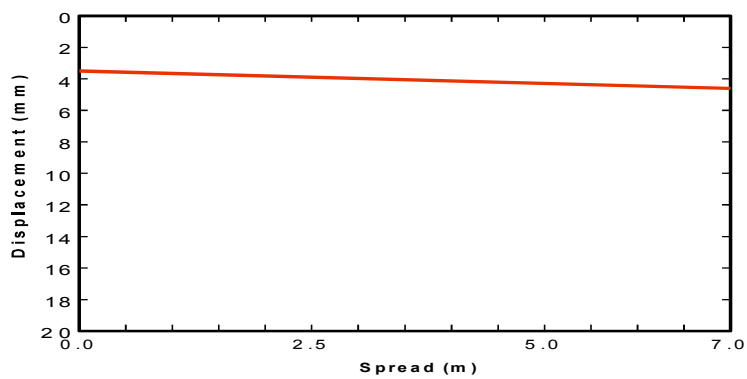
第2章 タイヤチップの力学特性



タイヤチップ地盤改良ケース A



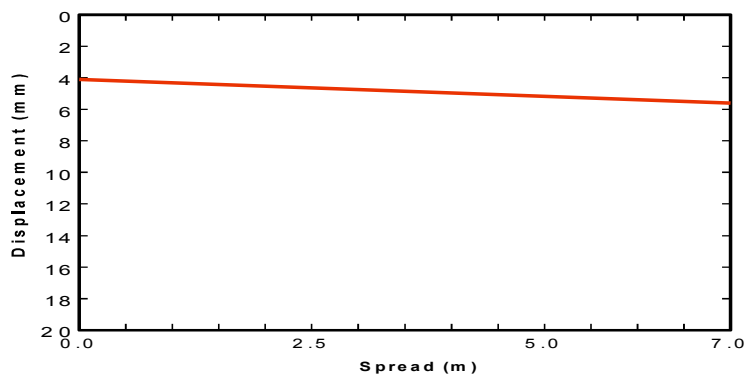
タイヤチップ地盤改良ケース B



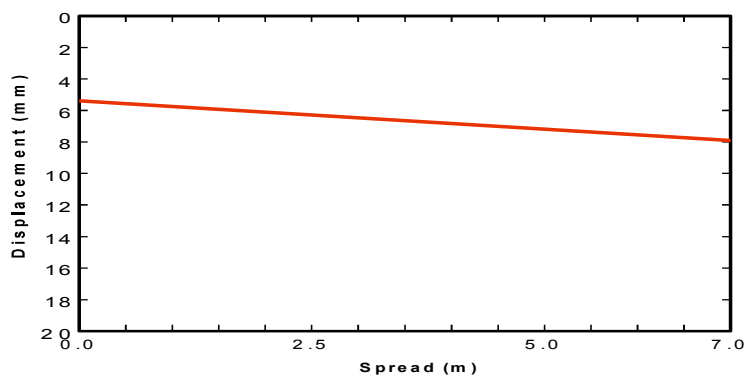
タイヤチップ地盤改良ケース C

図 2.4.10 住宅荷重モデル 2 に対する沈下傾斜解析結果

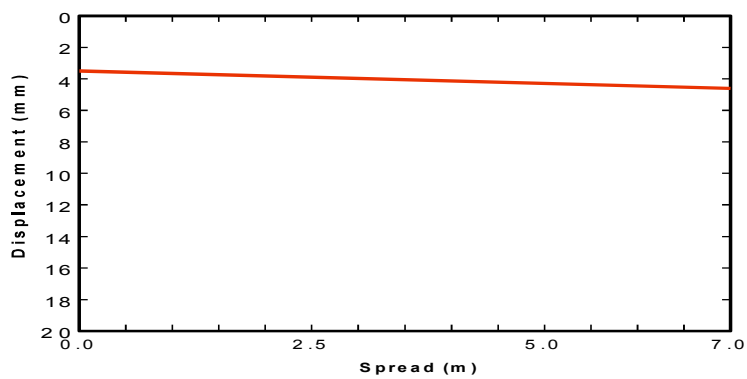
第2章 タイヤチップの力学特性



タイヤチップ地盤改良ケース A



タイヤチップ地盤改良ケース B



タイヤチップ地盤改良ケース C

図 2.4.11 住宅荷重モデル 3 に対する沈下傾斜解析結果

表 2.4.3 住宅基礎の沈下傾斜値

	タイヤチップ地盤改良ケースA	タイヤチップ地盤改良ケースB	タイヤチップ地盤改良ケースC
住宅荷重モデル1	0.09/1000	0.16/1000	0.06/1000
住宅荷重モデル2	0.21/1000	0.36/1000	0.16/1000
住宅荷重モデル3	0.11/1000	0.20/1000	0.09/1000

以上の解析結果より，全ての解析モデルに於いて，目標とした傾斜閾値である 3/1000 を大きく下回ることを確認し，タイヤチップ改良層を下層に配置する程，沈下量が小さくなることも確認した．また，タイヤチップを土のうに入れた場合，より沈下傾斜量が抑制されることが見て取れる．なお，タイヤチップ改良層厚の合計は 50cm で同じであるが，25cm の層厚に分けて上下層に敷設する地盤改良ケース B と 50cm の層厚にまとめて下層に敷設する地盤改良ケース A で沈下変形に差がでたのは，図 2.4.12 に示す荷重分散法¹¹⁾（ボストンコード法）で確認すると，表 2.4.4 に示すように地表面に載荷した家屋荷重（等分布荷重）は，GL-1m で約 2 割，GL-2m で約 4 割が分散効果により分散してしまうため，下層の GL-2m 位置にタイヤチップをまとめて敷設したケース A の方が沈下変形は少ないものと推測する．

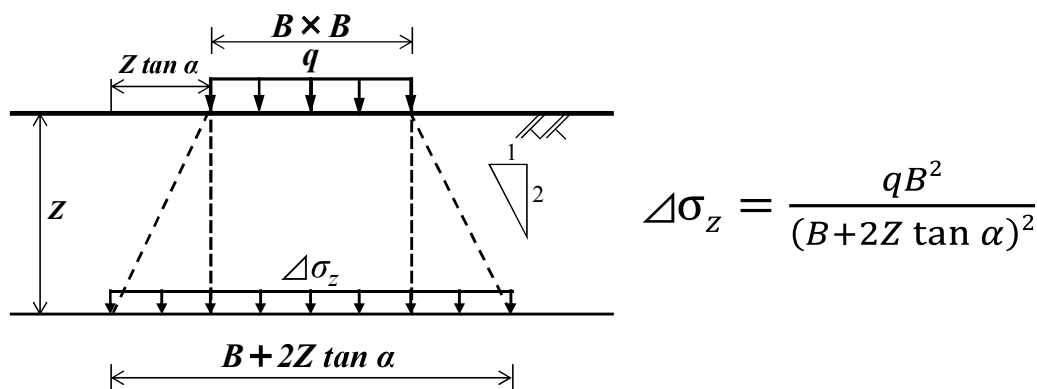


図 2.4.12 荷重分散法（ボストンコード法）

表 2.4.4 荷重分散法によって算出した地中応力

深度(m)	$\Delta\sigma_z(\text{kN/m}^2)$ ※
0	10.00
1	7.66
2	6.05

※基礎ラブ: 7m x 7m 住宅荷重: 10kN/m²

2.5 タイヤチップの動的変形特性

前項までの単調および繰返し三軸試験の結果より、タイヤチップは液状化を生じる材料ではなく、過剰間隙水圧の上昇を抑制する効果があることを確認した。タイヤチップの動的変形特性については、金子、兵動らは、中空ねじりせん断試験機を用い、廃タイヤの金属ワイヤー類を除去し、粒径が1mm以下となるように裁断したタイヤチップと同じく粒径1mm以下の相馬珪砂を用い、タイヤチップならびにタイヤチップ砂混合試料について実験を行っている¹⁾。表2.5.1および図2.5.11～図2.5.15は、この研究成果をタイヤチップと相馬珪砂の各単体について比較考察するために、ここで整理し直したものである。相馬珪砂とタイヤチップ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2.5.12(a)-(b)に、履歴減衰率 h と片振幅せん断ひずみ $(\gamma)_{SA}$ の関係を図2.5.13(a)-(b)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 $(\gamma)_{SA}$ の関係を図2.5.14(a)-(b)に、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 $(\gamma)_{SA}$ の関係を図2.5.15(a)-(b)に、有効拘束圧 $\sigma_c'=50, 100\text{kPa}$ の場合について示す。

表 2.5.1 試料の物理的性質

試料	タイヤチップ	相馬珪砂
細粒分含有率: F_c (%)	0	0
粒子密度: ρ_s (g/cm ³)	1.150	2.645
最大間隙比: e_{max}	2.502	1.077
最小間隙比: e_{min}	1.786	0.680

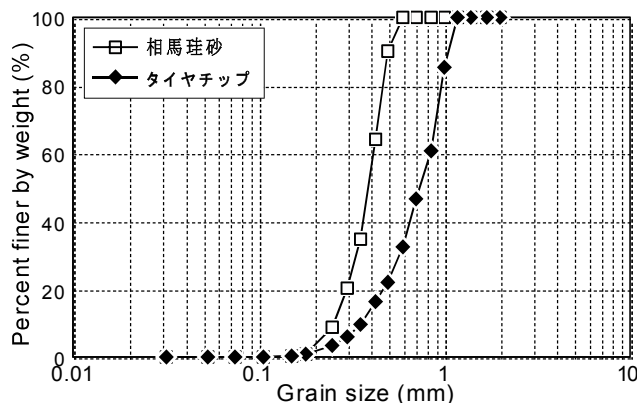
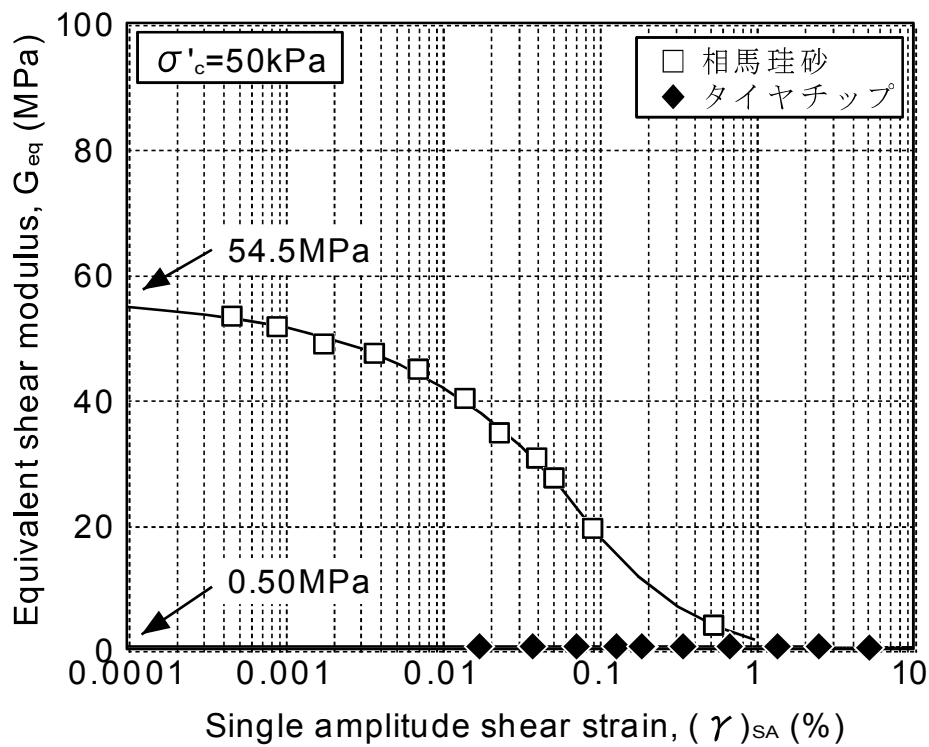
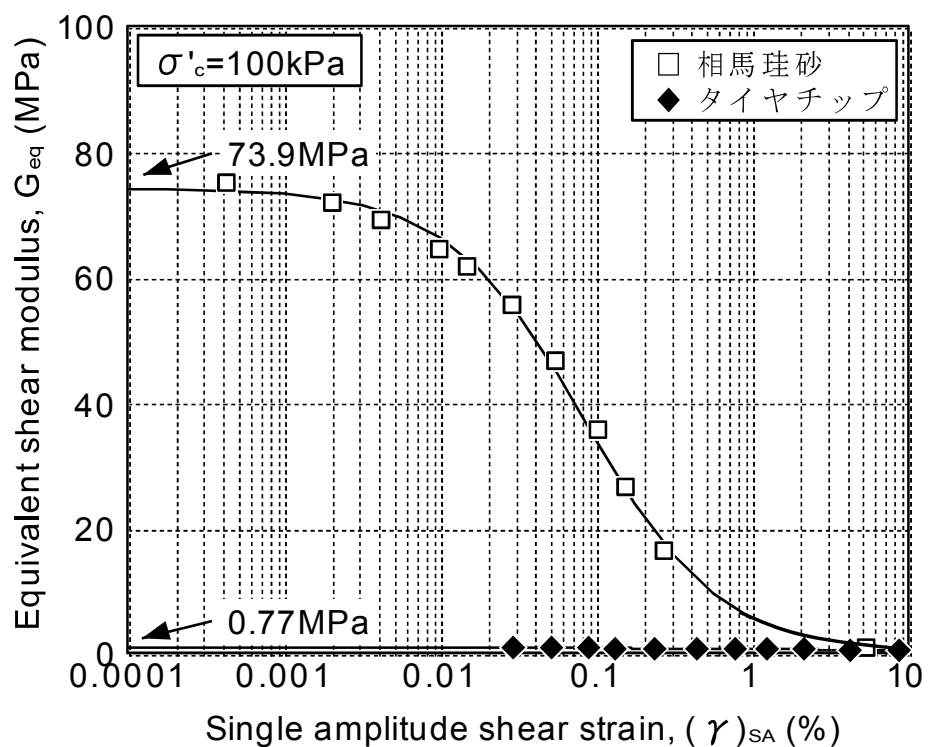


図 2.5.11 粒径加積曲線

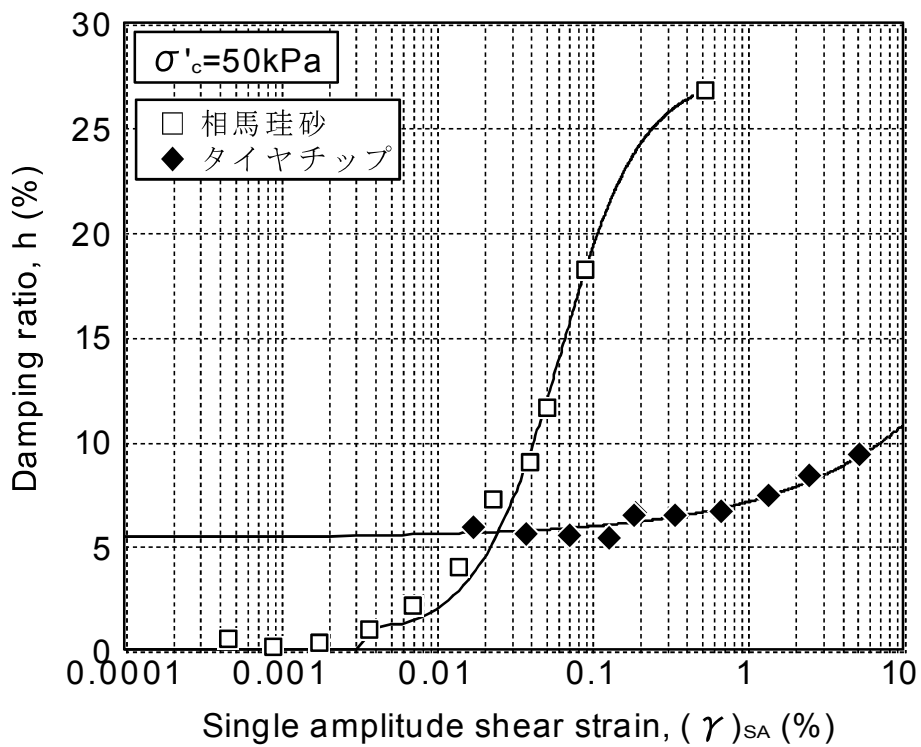


(a) $\sigma'_c = 50 \text{ kPa}$

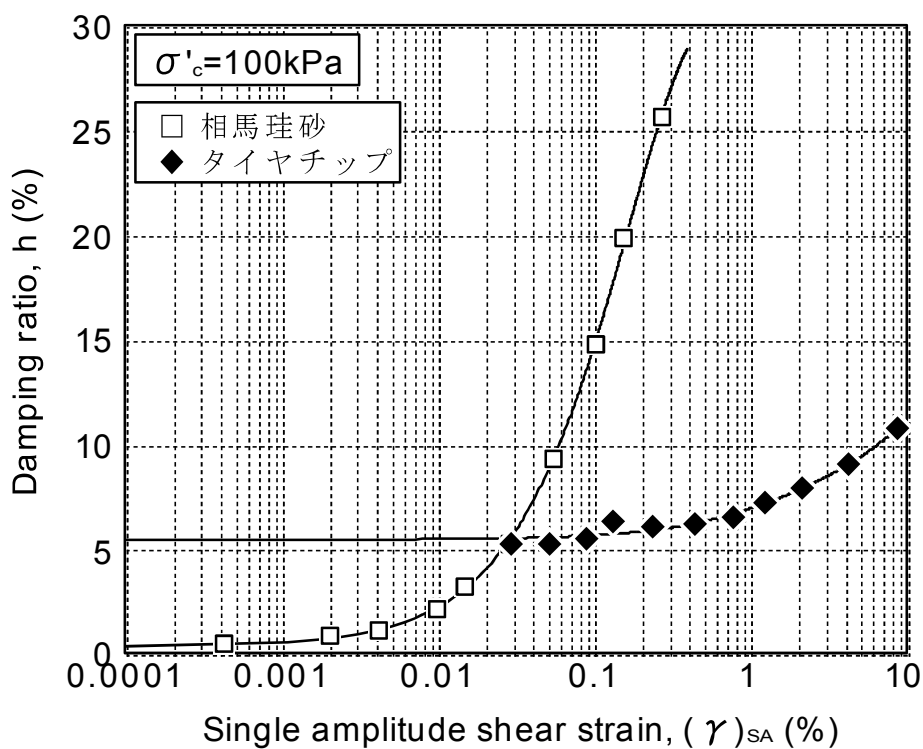


(b) $\sigma'_c = 100 \text{ kPa}$

図 2.5.12 等価せん断弾性係数と片振幅せん断ひずみの関係

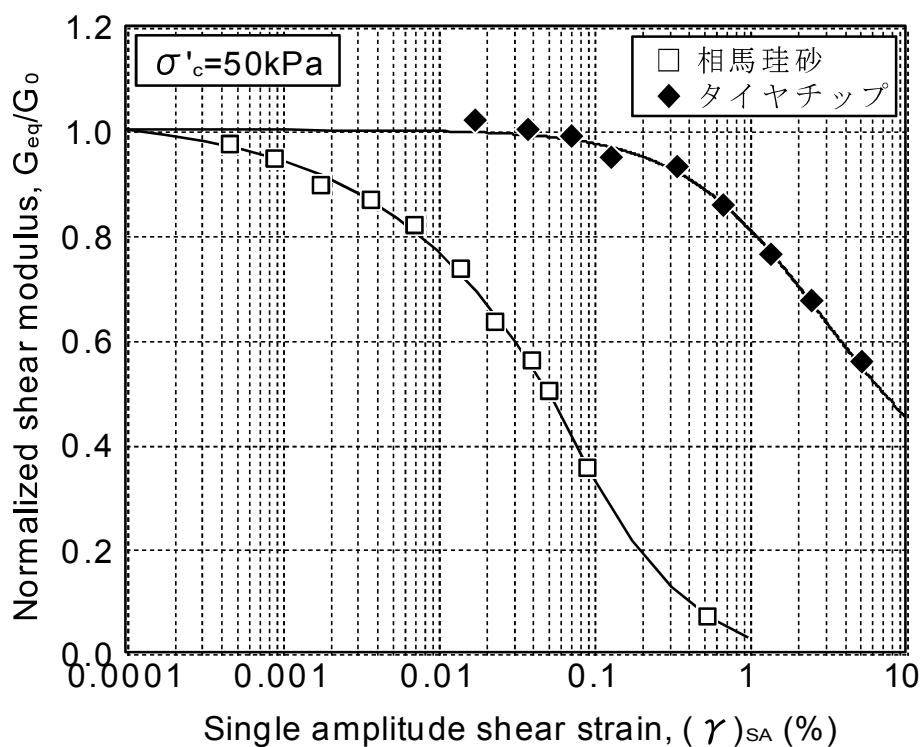


(a) $\sigma'_c = 50 \text{ kPa}$

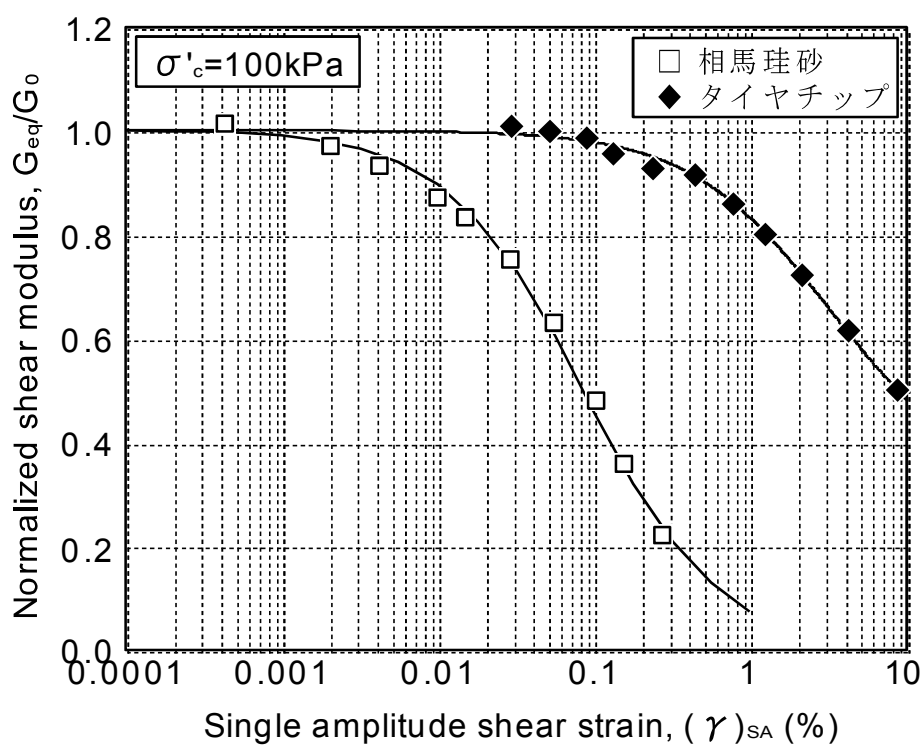


(b) $\sigma'_c = 100 \text{ kPa}$

図 2.5.13 履歴減衰率と片振幅せん断ひずみの関係

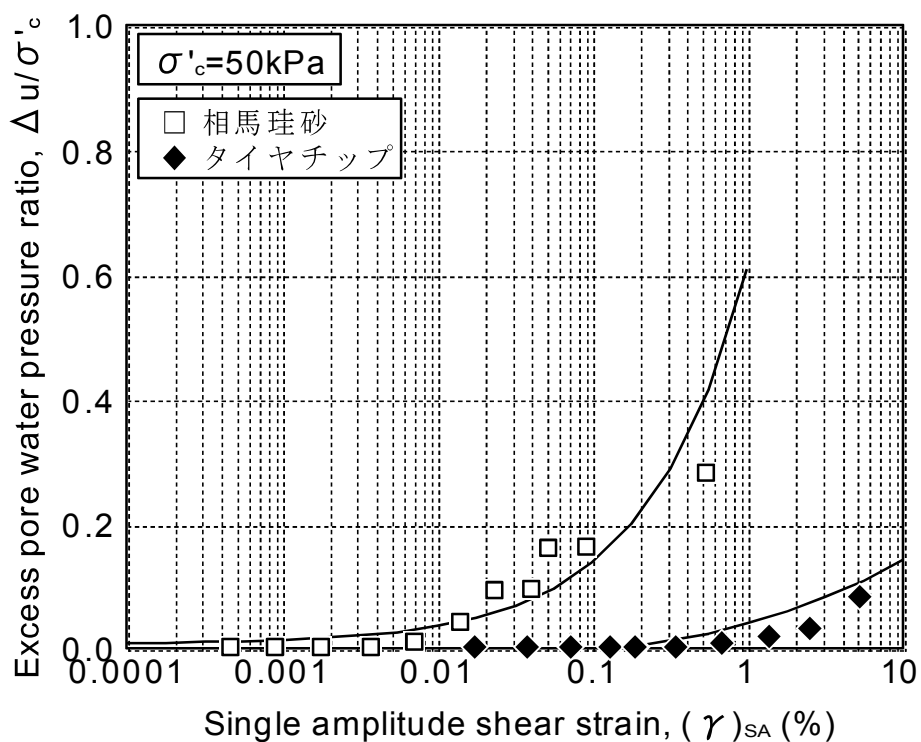


(a) $\sigma'_c = 50 \text{ kPa}$

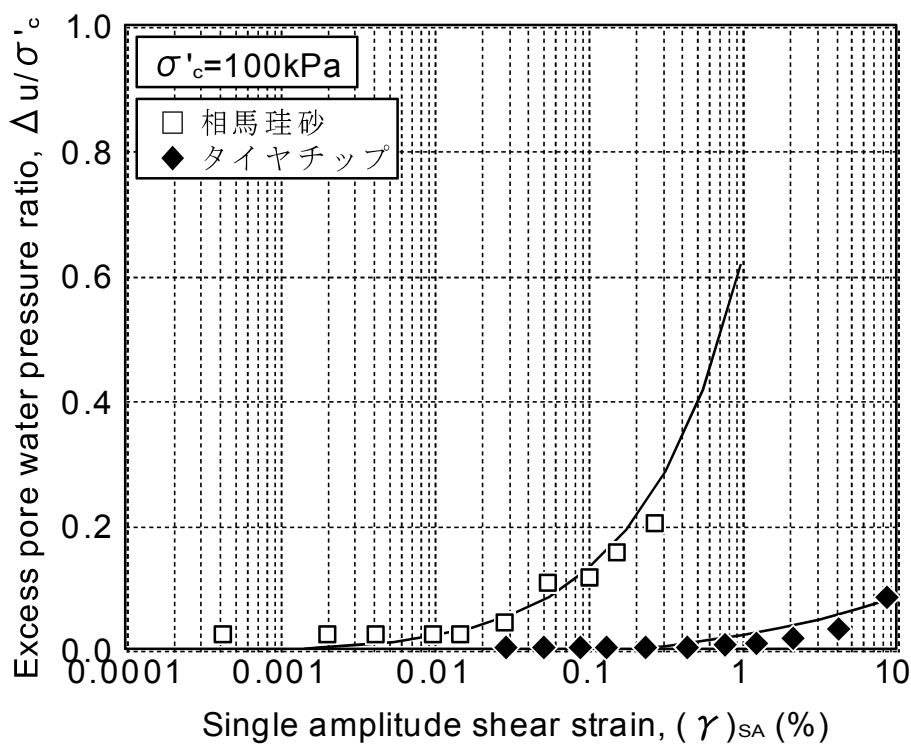


(b) $\sigma'_c = 100 \text{ kPa}$

図 2.5.14 G_{eq}/G_0 と片振幅せん断ひずみの関係



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



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

図 2.5.15 過剰間隙水圧比と片振幅せん断ひずみの関係

図2.5.12より、タイヤチップの初期せん断弾性係数は、珪砂と同等に拘束圧の影響を受けているが、非常に小さく、いずれの有効拘束圧においても珪砂の約1/100程度の値となっており、珪砂のせん断ひずみ振幅1%以上におけるせん断剛性とほぼ等価な剛性を示している。すなわち、タイヤチップのせん断弾性係数は、液状化を起こした状態の砂のそれと同等であると言える。タイヤチップにおいては、剛性がこのように低いことがせん断波の伝搬を低減し、後に述べる地震時の免震効果を引き出すものと考えられる。また図2.5.13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ているのに対し、珪砂の場合は、片振幅せん断ひずみ $(\gamma)_{SA}=0.01\%$ 程から急激に増加していることや、タイヤチップの $h\sim\gamma$ 関係は有効拘束圧の影響を受けないことが見て取れる。

次に図2.5.14より、 G_{eq}/G_0 の減少は珪砂の場合は有効拘束圧の影響を受け、拘束圧の増加により低下を始めるせん断ひずみ振幅が増加するが、概ねせん断ひずみ振幅が0.01%程度で急激に低下するのに対し、タイヤチップの場合は有効拘束圧の影響を受けず、せん断ひずみ振幅が約10倍高い0.1%を超える付近から緩やかに低下する傾向が認められる。この事象は、タイヤチップは珪砂に比べ弾性域が長く、間隙水圧の発生による有効応力の低下に伴う剛性低下が生じていないことによると考えられる。この結果は、図2.5.15に示すように、間隙水圧が珪砂の場合で、せん断ひずみ振幅が0.01%を超えたところで、タイヤチップの場合は、0.1%を超えたところでそれぞれ発生し始めていることや、間隙水圧の発生量がタイヤチップの場合、珪砂に比べ低いことと対応している。

2.6 本章の要約

本章では、タイヤチップの最大の特性である液状化抑制材料としての有効性を生かし実用化するために必要なタイヤチップの力学特性としてタイヤチップの圧縮、せん断特性を先ず調べ考察した。三軸試験機を用いて等方圧縮・除荷試験、排水・非排水せん断試験および除荷試験、平均主応力一定せん断試験・除荷試験をそれぞれ実施し、さらに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のメカニズムを調べ、それぞれの試験結果の対応で考察を行った。また、中空ねじりせん断試験より得られた広範なひずみ域におけるタイヤチップの動的変形特性を調べた。その結果、得られた知見は以下の通りである。

- (1) 排水・非排水条件下での単調せん断試験・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、軸ひずみ $\varepsilon_a=20\%$ まで載荷しても終始弾性的挙動を示し、破壊に至る兆候はみられない。
- (2) 排水・非排水条件下での平均主応力一定および側圧一定試験結果より、載荷時に発生した体積ひずみと間隙水圧は除荷時には、体積ひずみはわずかに残留ひずみがあるもののほとんど0に戻り、間隙水圧はほとんど消失していることより、タイヤチップのせん断試験による体積変化は、そのほとんどが粒子移動を伴う非可逆的なダイレイタンス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。
- (3) 排水条件下での側圧一定と平均主応力一定のせん断試験による体積ひずみと等方圧縮除荷試験による体積ひずみの比較から、タイヤチップの体積変化には、せん断試験除荷のみの場合はほとんど元の0に戻るが、等方応力成分も付加された載荷や等方圧縮除荷という等方応力成分のみの載荷の場合には、数%ではあるが、残留体積ひずみが生じるという載荷の違いによる特性があることを確認した。

- (4) (2), (3)の知見は、粒径 0.5mm 以下で粒度分布のあるタイヤチップ試料に関しての事項である。これに対して、粒径 2.0mm 以下のほぼ単一粒径のタイヤチップ試料にて、側圧一定排水単調せん断試験にて載荷・除荷を粒径 0.5mm のもと同様に実施した結果、軸差応力-軸ひずみ関係はほぼ 0 に戻ることを確認した。
- (5) (2), (3), (4)の知見より、タイヤチップ粒状体の圧縮・せん断変形のメカニズムを考察した。タイヤチップ供試体にせん断力のみ載荷した場合は、タイヤチップ粒子接触面にて可逆的な弾性変形のみが生じ、等方圧縮載荷をした場合は、主な骨格構造をなさない細かなサイズの粒子が、行き場が無く間隙部に、すべりや転位により粒子移動し、結果的に塑性的な変形（残留ひずみ）が生じたものと推測する。
- (6) 非排水繰返し三軸試験結果より、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く。また有効応力経路より、有効応力の低下は 1 割程度であり、過剰間隙水圧も累積増加することなく、タイヤチップは液状化が生じる材料ではないことを確認した。
- (7) 一連の単調および繰返し三軸試験結果および、ひずみ速度(載荷速度)を変えた排水単調せん断試験結果より、ひずみ速度が大きい程、剛性が上がり、過剰間隙水圧が発生し難くなるというひずみ速度効果がタイヤチップで確認でき、地震時のようにせん断ひずみ速度が大きい場合に、間隙水圧の発生量を抑えることは明らかである。
- (8) 中空ねじりせん断試験結果より、タイヤチップはせん断ひずみが増加しても過剰間隙水圧比はほとんど増加せず、過剰間隙水圧比は $\Delta u/\sigma'_c=0.2$ にも至らない。また、タイヤチップの初期せん断弾性係数は有効拘束圧の影響を受けているが非常に小さく、およそ砂の 1/100 程度の値であり、液状化を起こした場合のそれと同等であるといえる。

- (9) タイヤチップの動的変形特性 ($G_{eq}/G_0 \sim \gamma$ 関係および $h \sim \gamma$ 関係)は、本研究で適用した拘束圧の範囲では、有効拘束圧の影響を受けない。
- (10) 過剰間隙水圧比と片振幅せん断ひずみの関係より、過剰間隙水圧が珪砂の場合で、せん断ひずみ振幅が 0.01%を超えたところで、タイヤチップの場合、約 10 倍高い 0.1%を超えたところでそれぞれ発生し始めており、タイヤチップの動的変形特性 ($G_{eq}/G_0 \sim \gamma$ 関係および $h \sim \gamma$ 関係)と対応している。
- (11) 本研究での提案地盤改良は、通常的地盤剛性を上げるものと異なり、逆にタイヤチップの改良層において地盤剛性が下がることになるため、そもそも、タイヤチップ改良層があるがゆえに、住宅の不均一荷重（一部平屋建て或いは2階建ての3階建て）がかかった際に、沈下傾斜しないかを、有限要素法による2次元平面ひずみ弾性解析を実施し、検証した結果、品確法のレベル1（3/1000）にも満たないことを確認した。

参考文献

- 1) 金子崇, 兵動正幸, 中田幸男, 吉本憲正, HazarikaHemanta : 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性, 土木学会論文報告集 C, Vol.69, No1, pp.91-107, 2013.
- 2) 矢島寿一, 小倉一利, 山田忠幸, 小林展誠, 丸井祐司, 竹内基樹 : タイヤチップスのせん断特性と液状化特性, 地盤工学ジャーナル, Vol.4, No.1, pp.81-90, 2009.
- 3) 海野寿康, 仙頭紀明, 日野友則 : 2008年岩手宮城内陸地震における栗原市築館地区の沢埋め造成盛土斜面の崩壊事例について, 地盤工学研究発表会, pp.724-725, 2009.
- 4) 仙頭紀明, 齋藤諒, 齋藤剛一 : 細粒分を多く含む火山灰質砂質土の非排水繰返しせん断強さの発達特性, 土木学会第65回年次学術講演会, III-210, pp.419-420, 2010.
- 5) 矢島寿一, 小倉一利, アショカ・K・カルモカル, 安原一哉 : 古タイヤチップスの地盤材料としての力学評価, 地盤工学ジャーナル, Vol.1, No.1, pp.1-7, 2006.
- 6) 島田里美, HazarikaHemanta, 大谷順, 菊池喜昭, 御手洗義夫 : X線CTを用いたタイヤチップの一面せん断挙動, 第43回地盤工学研究発表会発表講演集, PP.527-528, 2008.
- 7) 島田里美, HazarikaHemanta, 大谷順, 菊池喜昭, 御手洗義夫 : 地盤材料としてのタイヤチップの一面せん断挙動—X線CTの適用—, ジオシンセティックス論文集, Vol.23, pp.75-82, 2008.
- 8) 島田里美, 大谷順, HazarikaHemanta, 菊池喜昭 : タイヤチップ混合砂の一面せん断特性における弾塑性挙動, 第44回地盤工学研究発表会, pp.409-410, 2009.
- 9) 日本建築学会 : 小規模建築物基礎設計指針, pp.253-256, 2008.
- 10) 浦安市液状化対策技術検討調査委員会 : 資料 3-3-1 地盤特性の把握・液状化の要因分析 1,2,3,4,
http://www.city.urayasu.chiba.jp/secure/26052/jibanwg1017_1_4.pdf
- 11) 日本建築学会 : 小規模建築物基礎設計指針, pp.74-87, 2008.

第3章 タイヤチップ適用地盤の液状化防止・応答低減効果

3.1 概説

地盤の地震時挙動に関する研究には、一般に地震応答解析が用いられる。地震応答解析を行うにあたり注意すべき点としては、地盤はあるひずみレベルを超えると非線形挙動を示す材料によって構成されているということである。このことから、地盤の地震時挙動を明確に評価するためには、地盤の非線形な振動特性を適切に表現する手法が求められてくる。ここで、地盤の非線形応答を解析する際には応力-ひずみ関係が必要となってくるが、通常は数式でモデル化した復元力特性を用いて数値解析される。地盤の振動特性を反映させた非線形構成モデルはいくつか提案されており、代表的なものとしては Hardin-Drnevich モデル（双曲線モデル）、Ramberg-Osgood モデル、Bilinear モデルが挙げられる。なお、Hardin-Drnevich モデル、Ramberg-Osgood モデルについては、短所を補うために修正されたものも提案されている。

しかし、地盤は複雑な構成となっているため、これらの構成モデルが大ひずみ領域において、どれほどの精度をもっているのか、地震時挙動を正確に表現しているかという疑問が生じてくる。そこで、本研究においては地盤の非線形な挙動を適切に表現する手法としてオンライン地震応答実験を採用した。オンライン地震応答実験は、対象とする解析断面を数値モデルに離散化し、その復元力特性および減衰特性を要素試験に用いる供試体から直接実験的に求め、それをコンピュータによる応答計算にオンラインで結びつけることにより、地震時挙動を表現するという手法である。この手法を用いることで、複雑な土の構成式を用いることなく、実際の土の復元力特性を反映できるため、先に述べた非線形構成モデルを用いるよりも精度のよい地震応答解析が可能となる。また、本研究に於いて地盤材料として用いるタイヤチップのような構成式や解析パラメータが不明な未知なる材料を用いる場合、その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計算にフィードバックすることにより、地震時の動的な液状化挙動を再現する事が可能となり、タイヤチップ適用地盤の液状化防止・応答低減効果を確認するに

は適した地震応答実験・解析となる。

この他、動の実験として本研究の目的である戸建住宅タイヤチップ適用地盤の液状化防止・応答低減効果の概念（図 1.4.1）をイメージして、イギリス・ブリストル大学にてバタチャリア博士指導のもと、実施した 1G 場振動台模型実験の結果も併せ考察し、タイヤチップの地盤材料としての有用性を評価・確認した。

本章では、動的試験としてオンライン地震応答実験と振動台実験を実施し、評価・確認したタイヤチップ適用地盤の液状以下防止・応答低減効果についての説明を行う。以下、節に従って本章を概説する。第 2 節ではオンライン地震応答実験の位置づけと既往の研究について述べ、第 3 節ではオンライン地震応答実験による地震応答実験の概要について説明する。第 4 節ではオンライン地震応答実験に用いた試料や、実験用地盤モデルならびに実験・解析条件を説明し、実験結果と考察を行っている。第 5 節では 1G 場振動台模型実験による液状化模型実験に用いた試料や、実験用地盤モデルならびに実験・解析条件を説明し、実験結果について述べ、第 6 節では、不均一戸建住宅荷重に対するタイヤチップ改良地盤の変形について有限要素法による 2 次元平面ひずみ解析を実施し、検証した。第 7 節において本章の要約を述べる。

3.2 オンライン地震応答実験の位置づけと目的

3.2.1 地震応答解析法の現状

一般に、地震応答解析は震度法で設計計算された構造物や基礎地盤に対して、地震時に経験するであろう実際の地震時挙動を再現することにより、構造物の耐震性や地盤の変形の程度を詳細に検討する際に行われる。今日では土木構造物の設計における安全性の検討において、地震時の耐震性が占める割合が大きなものとなっており、地震による被害を抑制するために、地震応答解析は必要不可欠なものとなっている。

地震応答解析は、1940年にカリフォルニア州土木局の N.C.Raab と H.C.Wood¹⁾によって吊橋を対象に行われたのが最初である。ここでは、地震動の入力は1.5秒以下の周期をもち無限に継続する片振幅0.1g(ここでのgは重力加速度)以下の正弦波であると仮定していた。この論文に対して、当時コロンビア大学の助教授であった M.A.Biot²⁾が記録された2つの地震動加速度の応答加速度を用いた地震応答解析法を提示した。この論文こそが今日の地震応答解析法の実用問題に関する応用の始まりであったといえる。また、1932年に始まった米国西部での強震観測における強震記録の採取および技術革新に伴う機械式積分器の実用化により、地震応答解析は飛躍的發展を遂げた。なお、我が国においては1952年に通商産業省資源調査会に強震測定委員会が設立され、SMAC型強震計といわれる耐候性のある工学的強震計が開発された。その強震計は1954年に第1号機が東京大学地震研究所に設置され、1956年に我が国で初めて強震記録が得られた。これらの観測計から得られた成果としては、強震の波形とその特性、構造物等の地震応答とその特性、強震の地表面付近における伝播特性が挙げられる。

上述のように地震応答解析の方法論については1930年代に成果を得ていたのであるが、入力すべき物理量については研究の途上にあり、計算を行う技術も電子計算機の出現を待つほかはなかった。地震動の入力については、1930年代に妹沢、金井ら³⁾により提起されており、1953年には Housnerら⁴⁾によって地震応答スペクトル曲線が示された。また、解析の対象となる構造物の動的性質としては1901年の大森による橋梁の振動に関する研究⁵⁾に始ま

り、今日の構造物の変形性能、信頼性解析に関する研究へと発展している。土および土を主体とする構造物の動的性質については、目的や用途によって研究がなされ、今日も継続されている。以上のような経緯を経て、現在の地震応答解析に至っている。

ここで、これまで述べたような地震応答解析には、応力-ひずみ関係を求めるために非線形構成モデルが用いられている。しかし、この非線形構成モデルにはどれほどの精度で地震時挙動を表現できるかという疑問が生じる。そこで、非線形構成モデルを用いることなく、実際の供試体から応力-ひずみ関係を求めることが可能なオンライン地震応答実験がいくつかの機関で採用されている。

なお、地震応答解析法は応力対象、非線形性、計算領域等によって解析手法が分類される⁶⁾。その主な分類を表3.2.1に示す。

表 3.2.1 地震応答解析法の分類

特徴から見た分類		手法の名称	特徴・備考
対象とする応力による分類		全応力解析	間隙水圧の発生を計算しないので簡便
		有効応力解析	間隙水圧を考慮 → 液状化, 圧密
非線形性による分類		等価線形解析	さほど非線形が強くない
		非線形解析	理論的に厳密
領域による分類	時間領域による解法	重複反射理論	一次元のみ, 厳密解, 等価線形とペア
		複素剛性法	等価線形とペア
		逐次積分法	時間方向の差分法, 実現象に適用させ易い
	空間領域による解法	差分法	使用頻度が低い
		有限要素法	最も広く使用される
		厳密解 固有値解析	一次元, 線形 現象の理解
要素試験と応答計算を併用		オンライン実験	要素試験から復元力を測定, 普及度は低い

3.2.2 オンライン地震応答実験の位置づけ

現在のオンライン地震応答実験の位置づけであるが、今後建設される土木構造物には地震を含む災害に対して安全性が求められ、地震時における構造物の性能を検討するために地震応答解析が行われる。ここで、地盤に関して考えると、地盤はひずみが増大すると非線形な挙動を示す材料であり、解析においてその復元力特性を表現するには複雑な構成式が用いられているが、その精度がどの程度のものかということは重要な問題である。このような背景のもと、オンライン地震応答実験は開発された⁷⁾。オンライン地震応答実験では要素試験に用いられる供試体から直接復元力特性を得ることができ、実際の土のもつ復元力や減衰特性といった非線形性を表現することが可能となる。つまり、オンライン地震応答実験は地震時における構造物や地盤の挙動を適切に表現する手法といえる。また、本研究の於いても、タイヤチップのようなその構成式や解析パラメータが不明である未知なる材料を地盤材料として適用した場合の地震時の動的な液状化挙動を再現し、評価・確認するうえでも、最適の手法であると考えられる。

3.2.2 オンライン地震応答実験に関する既往の研究

オンライン地震応答実験は、1969年に伯野らによりアナログ計算機と実験とをオンラインで結ぶハイブリッドシステムとして提案され、はりの動的破壊実験について最初のシステムの開発および実験がなされた⁷⁾。つまり、伯野らがこの手法の生みの親である。この手法を生み出した背景には、地震時の挙動に興味を示され、地震時挙動を評価するにあたって構造物の応力-ひずみに関する関係を認知した上で振動計算を行うには時間がかかる。時間をかけない方法として、実験を行いながら計算を行ってはどうかということであった。これ以降、技術の進歩に伴い、アナログ計算機からデジタル計算機に置き換わるという背景のもと、1980年代半ばまではオンライン実験の原理や手法の開発に関する研究として進められた。この間の歴史、現状については家村⁸⁾によりまとめられており、それによれば“ハイブリット実験(オンライン実験)とは、ソフトな数値解析プログラム内に複雑・未知な要素の特性を実

験により取り出すハードなサブルーチンを含めたもの”と定義されている。この時代におけるハイブリッド実験に関する研究としては、高梨・岡田らによって構造物あるいは構造物部材の弾塑性地震応答解析を行うシステムの開発^{9),10)}が行われ、高梨らは高力ボルト摩擦接続部にすべりが生じる多層骨組、岡田らは鉄筋コンクリート骨組に対して地震応答解析を行っている。また、建築研究所において鉄筋コンクリート造の実物大7層供試体における地震応答載荷システムが開発され、塑性域における力学的挙動解明に関する研究が進められた¹¹⁾。山田・家村らは鉄筋コンクリート曲げ部材のハイブリッド実験システムを開発し、RC柱模型の曲げせん断地震応答載荷実験を実施している¹²⁾。さらに、伯野らによる砂層中の杭模型頂点における変位-復元力の関係を取り込む実験¹³⁾、望月による杭上部構造物連成系の振動解析¹⁴⁾、片田らによる液状化地盤の変位-復元力関係に関する研究¹⁵⁾等が行われている。その後、構造系の分野を主として実験制御方法や多自由度の実験方法の研究が盛んに行われるようになり、1986年と1987年には産・学・官の約15機関によるオンライン応答実験研究委員会が組織され、研究成果の集約と現状と将来の展望について報告がなされている^{16),17)}。そこでは、本手法は原則的に精度よく地震応答挙動を再現できることが確認され、普及期にさしかかっているとされている。近年における研究としては、中島らによりサブストラクチャ法に適した積分手法の提案¹⁸⁾、兵庫県南部地震を対象に行われた中井らの鋼製・合成橋脚柱の耐荷性状に関する研究¹⁹⁾があり、現在もなおオンライン実験の応用範囲は拡大している。

一方、地盤工学を対象にした最初の取り組みとしては、片田らによって1質点系の砂層地盤を対象に繰返し三軸試験装置を用いた液状化に関する研究¹⁵⁾が行われた。この研究では乾燥砂、飽和砂、不飽和砂を用いて実験を行っており、飽和砂においては液状化を生じ、完全液状化状態の過程まで非線形振動解析が可能であることを提示している。同じく繰返し三軸試験装置を用いた1質点系を対象とした液状化に関する研究として榎並・安達らの研究²⁰⁾が挙げられるが、ここでは実験の妥当性の検討、液状化進行過程における有効性が示されている。また、中空ねじり単純せん断試験装置を用いた研究として、日下部らによる研究^{21)~26)}がある。日下部らは、1質点、2質点、6質

点系の実験システムの開発を進め、多質点における実験の再現性を示すとともに、実験手法の改良を施している。その他中空ねじり単純せん断試験装置を用いた研究として、前川・山田らによる排水量を制御した液状化試験²⁷⁾、安達らによる実験システムの開発²⁸⁾がある。

ここで、オンライン実験手法を地盤工学の分野に適用するには、地盤材料の復元力を実測する室内土質せん断試験が適切に実地盤の状態を再現したものであることが重要なポイントとなる。この課題に関する取り組みとして、日下部らは水平地盤における応力状態が単純せん断状態であるとして、2台の中空ねじり単純せん断試験装置による2質点系のオンライン実験を行い^{22)~24)}、さらに自由度を加えて6台の中空ねじりせん断試験装置を用いて6質点系に対するオンライン実験を行った^{25),26)}。この研究では、オンライン実験結果における誤差の検討・実験アルゴリズムの改良を行うことで、地盤を対象とする際の適切な実験手法の確立を行っている。これら日下部らの研究成果はその後の地盤系オンライン実験に反映されている。また、取り扱いを容易にするために、日下部らは簡易単純せん断試験装置の試作²⁹⁾を行うとともにその試験機の精度を向上し、オンライン実験に適用した。

近年においては、日下部らにより粒子表面形状の異なる砂を用いた研究³⁰⁾や薬液(シリカ薄液)による改良砂を用いた研究³¹⁾といった砂の液状化抵抗に関する実験が行われている。また、兵動らにより土構造物基礎地盤や土構造物そのものの2次元的問題に対してオンライン実験が適用されてきた。土構造物を対象とした実験として、兵動・藤井ら^{32)~38)}は河川堤防の地震時安定度評価や道路用高盛土の耐震性の評価に関して研究を行っている。河川堤防を対象とした実験ではゾーン別の破壊形態について検討しており、高盛土に関する研究では、盛土材料として用いられる試料のせん断特性を明らかにした上で、入力加速度波形や盛土高さを変化させてオンライン地震応答実験を行うことにより地震時挙動を検討するとともに、地震時における盛土の変形を考慮した安定性評価法を提案している。兵動らは氷海域における重力式海洋構造物基礎地盤の安定性の評価に関する研究^{39)~42)}も行っており、地震時に氷海構造物および基礎地盤に与える氷荷重の影響や地盤の変形に関して検討を行っている。また、地震の被害は多種多様であり、そのひとつとして液状化が

ある。液状化による被害は地盤構成によっても異なる。兵動・河本らは種々の物性から成る水平地盤に関して研究⁴³⁾を行っている。砂・粘土から成る水平地盤においては砂層と粘土層で非線形性が異なり、砂・粘土層の層序や粘土層の層厚が変化することで上層へ及ぼす影響は異なることが認められた。さらに、液状化層における間隙水圧の発生量は下層での累積損失エネルギーと相関性が見られ、液状化層から離れた位置における損失エネルギーが大きいと液状化層での間隙水圧の発生量は小さくなることが分かっている。兵動・高橋・木村らは液状化対策工法のための基礎的研究として、薬液注入工法による多層固化改良の提案^{44)~50)}とオンライン地震応答実験による並列モデルの開発⁵⁵⁾を行っている。薬液注入工法は従来、多点浸透注入工法⁵¹⁾であり、対策が必要とされる地盤に対して構造物を囲む形で深さ方向に垂直に改良するものであった。この場合、広範囲にわたり改良が必要とされ他の液状化対策と比較し大幅にコストの面で不利になるといったことや、新設構造物に対してのみ適用可能であるといった適用の限界があった。そこで、板状の固化改良体を液状化対象層内に多層に配置することにより、地盤の軟化や液状化を許容して減衰効果を期待すると共に沈下および不同沈下を低減することを期待した多層固化改良を提案している。また、並列モデルの開発は、オンライン地震応答実験に杭-構造物-周辺地盤の地震時挙動を評価するための解析手法である修正 Penzien 型モデルを組み込んでいる。そして、実験結果を振動台実験および FEM 解析結果^{52)~54)}と比較し、よく対応していることを確認している。その他にも、山口・風間らは兵庫県南部地震時におけるポートアイランドの挙動に関する研究^{56),57)}としてオンライン実験を用いており、埋立層-沖積粘土層の関係について検討を進めている。

最近の研究では兵動、金子ら^{58),59),60)}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、応答加速度低減や液状化低減の効果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ている。また兵動・金子らは、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 と有効応力の一種であるオンライン地震応答解析を行った結果、両解析に於いて、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よく対応している⁶¹⁾。

3.3 オンライン地震応答実験による地震応答解析の概要

3.3.1 オンライン地震応答実験の概念

地盤系オンライン地震応答実験は、実地盤の土要素を近似した供試体に応答計算で得られた変位を準静的に加え、その際に実測した復元力を次のステップの応答計算に結びつける過程を繰り返すことにより地震時の地盤挙動を模擬する手法である⁶²⁾。

この手法では、図 3.3.1 に示すように解析対象地盤を集中質量法により質点系にモデル化し、各々の質点間はバネとダッシュポットがあるとして復元力特性および減衰特性を表現している。このモデル化した解析対象地盤に対して、図 3.3.2 に示すオンライン地震応答実験のフロー図のように、基盤面から地震動を入力し、コンピュータにより各々の質点に対して質点系の振動方程式を解くことで応答変位を求める。次に、得られた応答変位に相当するせん断ひずみをコンピュータ制御により供試体に与え、その時自動計測された復元力を用いて次のステップの応答変位を算出する。この過程を地震動が継続する間、繰り返す。すなわち、時々刻々と変化する地盤の非線形な復元力特性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シミュレートする方法である。

したがって、オンライン地震応答実験は、フィールドでの地震観測や振動台実験、遠心力実験等で得られる動的な応答と要素試験で得られる精度の高い定量的な変形、強度特性、間隙水圧特性を直接的に求めることができる。ここで、多層から成る地盤のすべてに対して要素実験を行うことは、システムが高価になるばかりではなく作業も煩雑化する。そこで、実験対象断面のうち、液状化や大変形が予想される地盤要素のみを要素試験によってせん断応力を求め、その他の部分は数学モデルでせん断応力を求めるサブストラクチャ法がある。

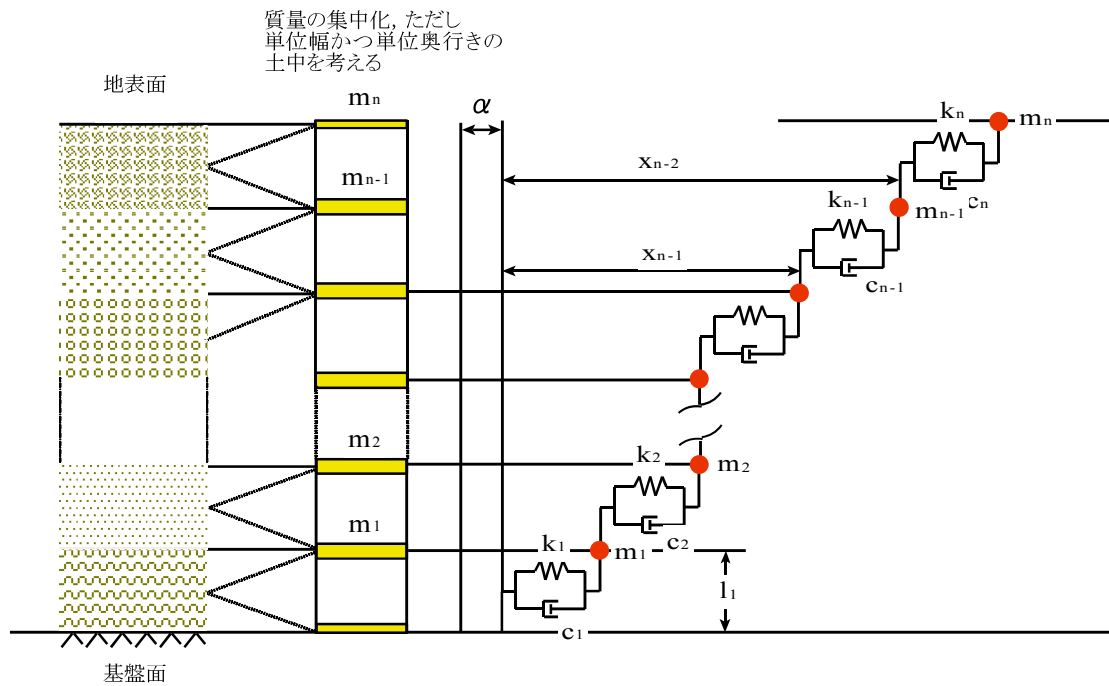


図 3.3.1 質点系のモデル化

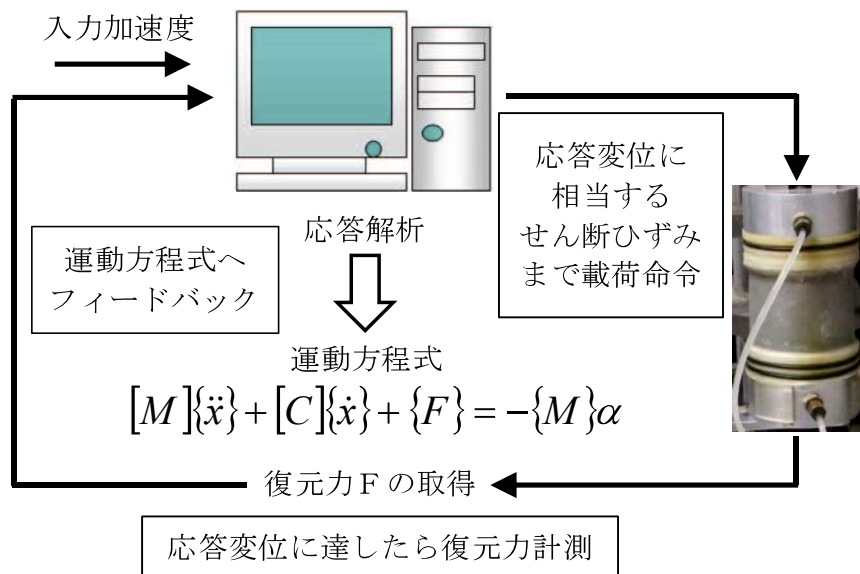


図 3.3.2 オンライン地震応答実験のフロー図

3.3.2 解析方法

(1) 振動方程式

本研究によるオンライン地震応答実験には、以下の振動方程式を用いた。

$$[M]\{\ddot{y}\} + [C]\{\dot{y}\} + [K]\{y\} = -[M]\{\alpha\} \quad (3.3.1)$$

ここに、 $[M]$ は質量マトリックス、 $[C]$ は減衰マトリックス、 $[K]$ は剛性マトリックス、 $\{\ddot{y}\}$ は相対加速度ベクトル、 $\{\dot{y}\}$ は相対速度ベクトル、 $\{y\}$ は相対変位ベクトル、 $\{\alpha\}$ は入力加速度である。

(2) 数値積分法⁶³⁾

地震動のような不規則な外力を受ける地盤の地震動応答を解析するには微小な時間間隔ごとに、(3.3.1)式の振動方程式を数値的に積分して解を定めていく数値積分法が用いられている。この方法は、時刻 t_i までの応答状態 $\{y_i, \dot{y}_i, \ddot{y}_i\}$ がわかっているとき、微小時間 Δt 後の時刻 t_{i+1} における状態 $\{y_{i+1}, \dot{y}_{i+1}, \ddot{y}_{i+1}\}$ を近似的に推定し、この操作を繰返して *step by step* に解を求めてゆくものである。

ここで、本研究に用いた数値積分法であるが、第1ステップのみを線形加速度法、第2ステップ以降では衝撃加速度法を用いている。第1ステップと第2ステップ以降で数値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第1ステップ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にあまり信頼がおけないためである。

以下に、線形加速度法と衝撃加速度法についての説明を行う。

a) 線形加速度法

1自由度系の線形地震応答を考えると、

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = -my_0 \quad (3.3.2)$$

時刻 t_n および $t_{n+1}(=t_n + \Delta t)$ における状態を $y_n, \dot{y}_n, \ddot{y}_n$ および $y_{n+1}, \dot{y}_{n+1}, \ddot{y}_{n+1}$ と

する． t_n における値は既知数， t_{n+1} における値は未知数である． t_n および t_{n+1} 時刻の地震加速度 y_{0n} および y_{0n+1} はいずれも既知である．

いま，微小区間 Δt で加速度が図-3.3.3(a)のように直線的に変化すると仮定する．このとき $t_n \leq t \leq t_{n+1}$ における加速度，速度および変位は次のようになる．

$$\ddot{y}(t) = \ddot{y}_n + \frac{\ddot{y}_{n+1} - \ddot{y}_n}{\Delta t} \cdot (t - t_n) \quad (3.3.3)$$

$$\begin{aligned} \dot{y}(t) &= \dot{y}_n + \int_{t_n}^t \ddot{y}(t) dt \\ &= \dot{y}_n + \ddot{y}_n(t - t_n) + \frac{1}{2} \frac{\ddot{y}_{n+1} - \ddot{y}_n}{\Delta t} (t - t_n)^2 \end{aligned} \quad (3.3.4)$$

$$\begin{aligned} y(t) &= y_n + \int_{t_n}^t \dot{y}(t) dt \\ &= y_n + \dot{y}_n(t - t_n) + \frac{1}{2} \ddot{y}_n(t - t_n)^2 + \frac{1}{6} \frac{\ddot{y}_{n+1} - \ddot{y}_n}{\Delta t} (t - t_n)^3 \end{aligned} \quad (3.3.5)$$

式を見ればわかるように，図 3.3.3 のように加速度は 1 次式(線形)，速度は 2 次式，変位は 3 次式で表される．

t_{n+1} 時刻の変位および速度 y_{n+1}, \dot{y}_{n+1} は，(3.3.5)，(3.3.4)式で $t=t_n + \Delta t$ とおくことにより得られる．また，振動方程式(3.3.1)式が t_{n+1} 時刻で成り立つ．これから，次の 3 つの基本式が得られる．

$$y_{n+1} = y_n + \dot{y}_n \Delta t + \frac{1}{6} (2\ddot{y}_n + \ddot{y}_{n+1}) \Delta t^2 \quad (3.3.6)$$

$$\dot{y}_{n+1} = \dot{y}_n + \frac{1}{2} (\ddot{y}_n + \ddot{y}_{n+1}) \Delta t \quad (3.3.7)$$

$$\ddot{y}_{n+1} = -\frac{c}{m} \dot{y}_{n+1} - \frac{k}{m} y_{n+1} - \ddot{y}_{0n+1} \quad (3.3.8)$$

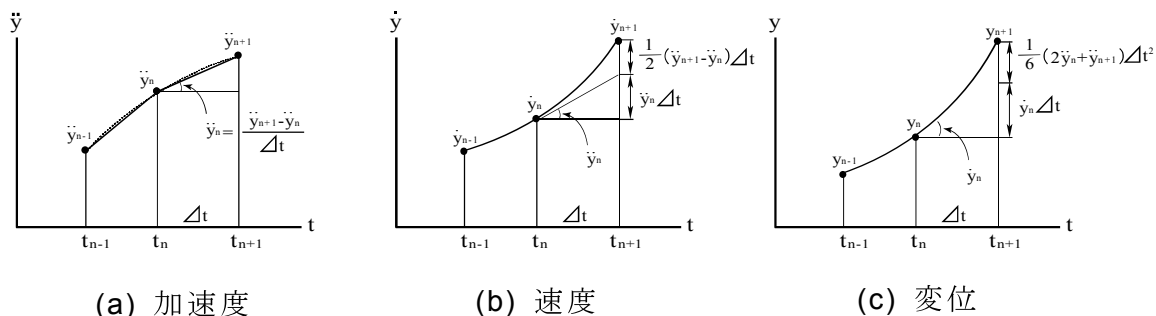


図 3.3.3 線形加速度法の概念図

(3.3.6), (3.3.7)式を(3.3.8)式に代入し, \ddot{y}_{n+1} について解けば,

$$\ddot{y}_{n+1} = - \frac{\ddot{y}_{0n+1} + \frac{c}{m} \left(\dot{y}_n + \frac{1}{2} \ddot{y}_n \Delta t \right) + \frac{k}{m} \left(y_n + \dot{y}_n \Delta t + \frac{1}{3} \ddot{y}_n \Delta t^2 \right)}{1 + \frac{1}{2} \frac{c}{m} \Delta t + \frac{1}{6} \frac{k}{m} \Delta t^2} \quad (3.3.9)$$

(3.3.9)式で求めた \ddot{y}_{n+1} を(3.3.6), (3.3.7)式に代入すれば y_{n+1}, \dot{y}_{n+1} の値が t_n 時刻の値から求まる.

b) 衝撃加速度法 (中央差分法)

図 3.3.4 のように, Δt 区間における加速度が t_n 時刻の直前に $\ddot{y}_n \Delta t / 2$, 直後に $\ddot{y}_n \Delta t / 2$ の大きさのインパルスとして働くものと仮定する.

速度は区間内で一定であり, 加速度インパルスの作用により不連続に変化する. また, 変位は直線変化する.

$t_{n-1} \sim t_n$ 区間および $t_n \sim t_{n+1}$ 区間の平均速度をそれぞれ $\dot{y}_{n-\frac{1}{2}}$, $\dot{y}_{n+\frac{1}{2}}$ とすれば,

$$\dot{y}_{n+\frac{1}{2}} - \dot{y}_{n-\frac{1}{2}} = \ddot{y}_n \cdot \Delta t \quad (3.3.10)$$

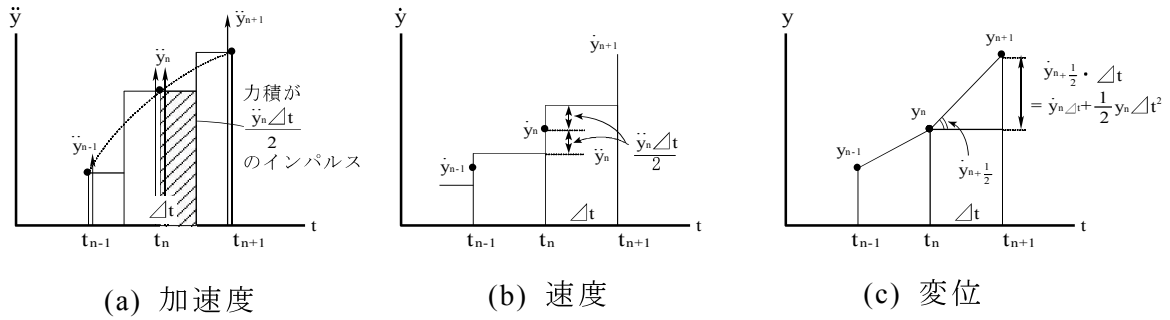


図 3.3.4 衝撃加速度法の概念図

平均速度と変位の関係は、

$$\dot{y}_{n-\frac{1}{2}} = \frac{y_n - y_{n-1}}{\Delta t} \quad (3.3.11)$$

$$\dot{y}_{n+\frac{1}{2}} = \frac{y_{n+1} - y_n}{\Delta t} \quad (3.3.12)$$

よって(3.3.10), (3.3.11), (3.3.12)式より、

$$y_{n+1} = 2y_n - y_{n-1} + \ddot{y}_n \Delta t^2 \quad (3.3.13)$$

となり、 t_n 時刻以前の状態から t_{n+1} 時刻の状態が定まる。

ここで、非線形の場合を考えると、 \ddot{y}_n は次の2式から定まる。

$$\dot{y}_n = \dot{y}_{n-\frac{1}{2}} + \frac{1}{2} \ddot{y}_n \Delta t = \frac{y_n - y_{n-1}}{\Delta t} + \frac{1}{2} \ddot{y}_n \Delta t \quad (3.3.14)$$

$$\ddot{y}_n = -\frac{c}{m} \dot{y}_n - \frac{Q(y_n)}{m} - y_{0n} \quad (3.3.15)$$

(3.3.14), (3.3.15)式から \ddot{y}_n を解き、(3.3.13)式に代入すると、変位に関する以下の式が得られる。

$$y_{n+1} = \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \frac{c}{m} \Delta t} \left\{ 2y_n - y_{n-1} + \frac{1}{2} \frac{c}{m} \Delta t \cdot y_{n-1} - \frac{Q(y_n)}{m} \Delta t^2 - \ddot{y}_{0n} \Delta t^2 \right\} \quad (3.3.16)$$

(3.3.16)式より t_{n-1} および t_n の時刻の変位を用いて t_{n+1} 時刻の変位を求めることができる。この方法は、 t_n における復元力そのものの値 $Q(y_n)$ を用い、接線剛性 $k(t)$ を用いていないことが特徴である。

なお、(3.3.13)、(3.3.14)式より次の式が成り立つ。

$$\begin{cases} \dot{y}_n = \frac{1}{2\Delta t} (y_{n+1} - y_{n-1}) = \frac{1}{\Delta t} \left\{ \frac{y_{n+1} + y_n}{2} - \frac{y_n + y_{n-1}}{2} \right\} \\ \ddot{y}_n = \frac{1}{\Delta t^2} (y_{n+1} - 2y_n + y_{n-1}) = \frac{1}{\Delta t} \left\{ \frac{y_{n+1} - y_n}{\Delta t} - \frac{y_n - y_{n-1}}{\Delta t} \right\} \end{cases} \quad (3.3.17)$$

上式より、衝撃加速度法では速度および加速度が図 3.3.5 のような中央差分により表されることがわかる。

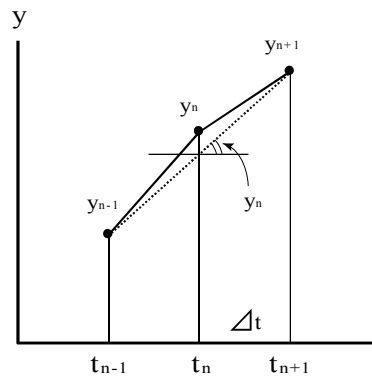


図 3.3.5 中央差分図

(3) ハイブリッド・サブストラクチャ法とその意義

オンライン実験には、対象とする質点すべてに対して要素試験を行う場合と、システムにかかる費用や作業量の低減のために一部の質点のみに対して要素試験を行い、その他の質点は従来の地震応答解析と同様に非線形構成モデルを用いる場合がある。後者の要素試験と構成モデルによる応答計算を組

み合わせた手法をハイブリッド・サブストラクチャ法という。全質点数が少なく、すべての質点に対して要素試験を行える場合には前者の手法を用いるべきであるが、質点数が多くなる場合には後者を用いることとなる。ここで、ハイブリッド・サブストラクチャ法において、要素試験を行う対象となる質点の決定方法であるが、地盤を対象におこなう際には砂地盤の液状化、もしくは大変形が予想される質点を要素試験の対象とする。これは、砂地盤は大変形を起こすと非線形性が大きくなり、構成式では対応しきれなくなる可能性があるが、要素試験では供試体から直接復元力特性を得ることができ、非線形な挙動を表現できると考えられるためである。

本研究においても、すべての質点に対して実験を行うのが困難であったため、このハイブリッド・サブストラクチャ法を採用している。

(4) 本研究で使用した非線形構成モデル^{65),66)}

本研究では、先に述べたハイブリッド・サブストラクチャ法を採用しており、非線形構成モデル部には原らによって修正が加えられた Ramberg-Osgood モデル(以後、修正 R-O モデルと呼ぶ)を用いた。ここでは、その修正 R-O モデルについて説明する。

a) 修正 Ramberg-Osgood モデル

このモデルは、金属の非線形特性を解析するために開発された累乗関数による Ramberg-Osgood モデルに対して、原らが修正を加えたもので、地盤の非線形解析の研究にしばしば用いられている。

このモデルの骨格曲線は、線形項にべき関数による非線形項を加えた形で表現される。

$$\tau = \frac{G_0 \gamma}{1 + \alpha \left| \frac{\tau}{\tau_f} \right|^{\beta-1}} \quad (3.3.18)$$

ここで、 G_0 は初期接線勾配、 τ_f はせん断強度、 α と β は物質定数であり、総

計4つのパラメータにより骨格曲線が規定される。

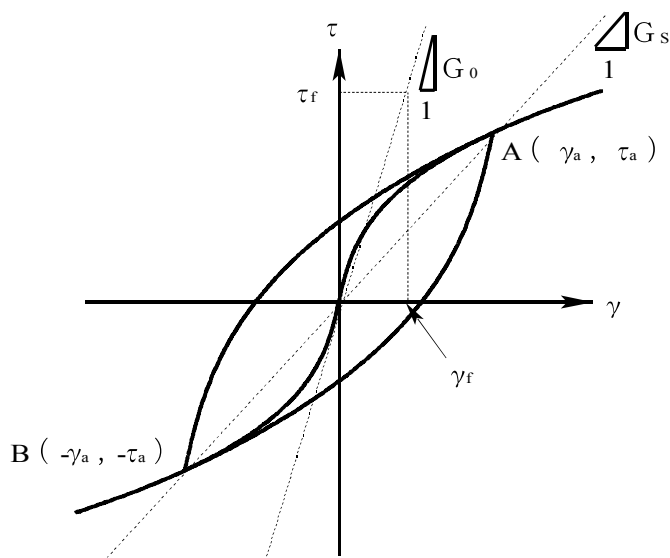


図 3.3.6 修正 Ramberg-Osgood モデル

(3.3.18)式において、 $\tau=\tau_a$ 、 $\gamma=\gamma_a$ 、 $G_s=\tau_a/\gamma_a$ とおくことで割線せん断弾性係数 G_s は、次式で表せる。

$$\frac{G_s}{G_0} = \frac{1}{1 + \alpha \left| \frac{\tau_a}{\tau_f} \right|^{\beta-1}} = \frac{1}{1 + \alpha \left| \frac{G_s \gamma_a}{G_0 \gamma_r} \right|^{\beta-1}} \quad (3.3.19)$$

ここで、 γ_r は $\gamma_r = \tau_f / G_0$ で定義され、規準ひずみと呼ばれる。

なお、この修正 Ramberg-Osgood モデルは、双曲線モデルである Hardin-Drnevich モデルに比べてパラメータが多いため、自由度が高いモデルである。

b) Masing 則⁶⁵⁾

地盤の地震応答解析では、応力-ひずみ関係を数値的にモデル化することにより応答を表現しているが、非線形な応力-ひずみ関係を図 3.3.6 に示すよう

に、処女载荷に対応する骨格曲線と、除荷・再载荷に対応する履歴曲線の組合せで表現することが一般的である。ここで、骨格曲線と履歴曲線については、それぞれ別個に定式化することもあるが、Masing 則を適用して骨格曲線から履歴曲線を規定する場合が多い。

Masing 則によれば、骨格曲線が

$$\tau = f(\gamma) \quad (3.3.20)$$

と表せるとき、応力の反転する折返し点 $A(\gamma_a, \tau_a)$ からの履歴曲線は、

$$\frac{\tau - \tau_a}{2} = f\left(\frac{\gamma - \gamma_a}{2}\right) \quad (3.3.21)$$

で与えられる。この履歴曲線は骨格曲線を2倍に拡大した形をしており、折返し点では骨格曲線の初期接線と同一の勾配を有する。なお、骨格曲線は奇関数、すなわち $f(-\gamma) = -f(\gamma)$ で与えられるものとする。

また、Masing 則に基づき応力-ひずみ関係を描く際には、以下の規則が適用される。

- ① 処女载荷、すなわち現在のひずみが絶対値で比較して過去の最大値より大きいとき、応力-ひずみ関係は骨格曲線に従う。
- ② 折返し点で反転した後の応力-ひずみ関係は履歴曲線に従う。
- ③ 履歴曲線が同方向へ向かう過去の履歴曲線と交差するときには、その後、過去の履歴曲線に移行する。

ここで、(a)に示した修正 Ramberg-Osgood モデルにおいて、Masing 則を適用することにより履歴曲線を求める。図-3.3.6において、折返し点 A の座標を $A(\gamma_a, \tau_a)$ とすると、修正 Ramberg-Osgood モデルの骨格曲線を表す(3.3.18)式、および Masing 則の履歴曲線を表す(3.3.21)式より、履歴曲線は次式のように定まる。

$$\tau - \tau_a = \frac{G_0(\gamma - \gamma_a)}{1 + \alpha \left| \frac{(\tau - \tau_a)}{2\tau_f} \right|^{\beta-1}} \quad (3.3.22)$$

なお，修正 Ramberg-Osgood モデルにおいて，減衰定数 h は次式によって示される．

$$h = \frac{2}{\pi} \frac{\beta - 1}{\beta + 1} \left(1 - \frac{G_S}{G_0} \right) \quad (3.3.23)$$

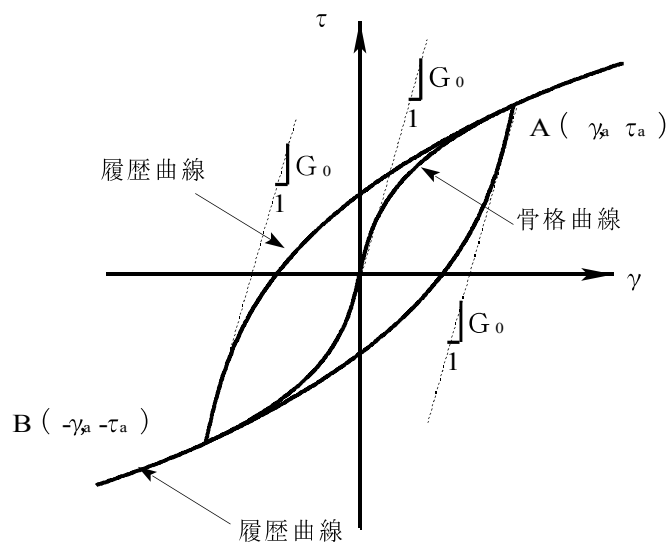


図 3.3.7 Masing 則に基づく履歴ループ

(5) 減衰について

減衰に関しては様々なものがあるが，代表的なものとしては履歴減衰，粘性減衰，逸散減衰が考えられる．ここで，本研究における振動方程式(3.3.1)式における減衰項[C]について以下に述べる．

振動方程式中の減衰は粘性減衰にあたり，式より速度に比例することがわかる．この[C]に関しては質量(質量比例型)とせん断弾性係数(剛性比例型)に関係があることが知られており，次式のように表される．

$$[C]=\alpha[M]+\beta[K] \quad (3.3.24)$$

α, β : 係数

この減衰はレーリー減衰(Rayleigh damping)⁶⁶⁾と呼ばれる。

ここで、 n 次モードの自由振動について考える。 n 次の減衰定数を h_n とすると、質量比例型、剛性比例型の h_n は

$$h_n=\alpha/2\omega_n \quad (3.3.25)$$

$$h_n=\beta \cdot \omega_n /2 \quad (3.3.26)$$

となり、それぞれ n 次の固有振動数に反比例、比例している。これらからレーリー型の減衰定数は

$$h_n=(\alpha/\omega_n+\beta \cdot \omega_n)/2 \quad (3.3.27)$$

となる。なお、 α, β は以下のようにして求められる。

$$\alpha = 2\omega_1 \cdot \omega_2(h_1 \cdot \omega_2 - h_2 \cdot \omega_1) / (\omega_2^2 - \omega_1^2) \quad (3.3.28)$$

$$\beta = 2(h_2 \cdot \omega_2 - h_1 \cdot \omega_1) / (\omega_2^2 - \omega_1^2) \quad (3.3.29)$$

以上は粘性減衰に関する説明であるが、このほかに本研究では非線形な挙動に対して生じる履歴減衰についても、実験供試体から復元力を測定して考慮されている。また、本研究においては逸散減衰について考慮していない。

3.3.3 実験装置の概要

(1) 簡易直接せん断試験装置²⁹⁾

本研究で使用したオンライン地震応答実験装置は、日下部らにより開発された簡易直接せん断試験装置を3台連結させたものである。ここでは、その簡易直接せん断試験装置の概略を述べる。

図3.3.8に試験装置の概略構造を、写真3.3.1に試験装置を示す。本装置は、日下部らにより開発された簡易直接せん断試験装置に対し、本校の山本技官により配管径路等に手が加えられ、使用しやすいように改良が行われている。以下、本装置の概略を述べる。①の供試体を厚さ0.5mmのゴムスリーブおよびキャップ(②)とペDESTAL(③)でシールし、側方向応力および軸方向応力のうちの等方圧成分における拘束圧は真空ポンプによる負圧を真空レギュレータで調節して作用させ、⑦の差圧計を用いて供試体内部の負圧と大気圧の差によって計測している。さらに、軸方向応力の異方圧成分は⑧のペロフラムシリンダーによりリニアモーションブロックに加え、リニアモーション(⑩)の鉛直動にガイドされ、キャップを介して独立に載荷している。そのため、本試験装置では異方圧密・せん断過程で三軸圧力室を必要とせず、加えて供試体の飽和度を高める方法として二重負圧法のみを採用しているため、二重管ビューレット、セル圧・背圧供給装置も不要である。しかし、真空により拘束圧を付加しているため、98kPa以上の等方圧を供試体に与えることはできない。また、水平方向のせん断変位は⑨のハーモニックギア付ステッピングモーター(減速比：1/100, 位置決め精度：0.0036度/ステップ)の回転運動を治具により水平運動に変換し、⑩のリニアモーションレールに固定したキャップを介して供試体に与えている。なお、軸方向の荷重は④のロードセル、水平方向の荷重は⑤のロードセルにより計測し、鉛直および水平方向の変位は⑥の非接触変位計で計測している。この非接触変位計の分解能は0.6 μ mで、高さ4cmの供試体では 1.5×10^{-5} 、高さ2cmでは 3.0×10^{-5} のせん断ひずみに相当する。

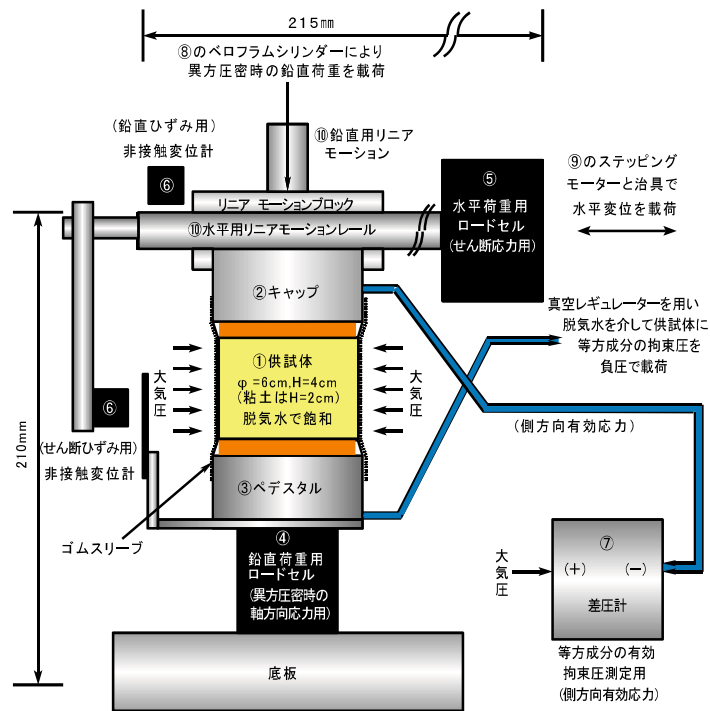


図 3.3.8 簡易直接せん断試験装置の構造



写真 3.3.1 簡易直接せん断試験装置

(2) 簡易直接せん断試験装置の制御・計測方法

図 3.3.9 に本研究で使用した簡易直接せん断試験装置の概略・配管図を示す。配管を太線で示しているが、本試験装置はコンピュータを用いて試験機の制御，データの取得が行われているため，制御，計測に関する機器はすべてコンピュータに接続されている。

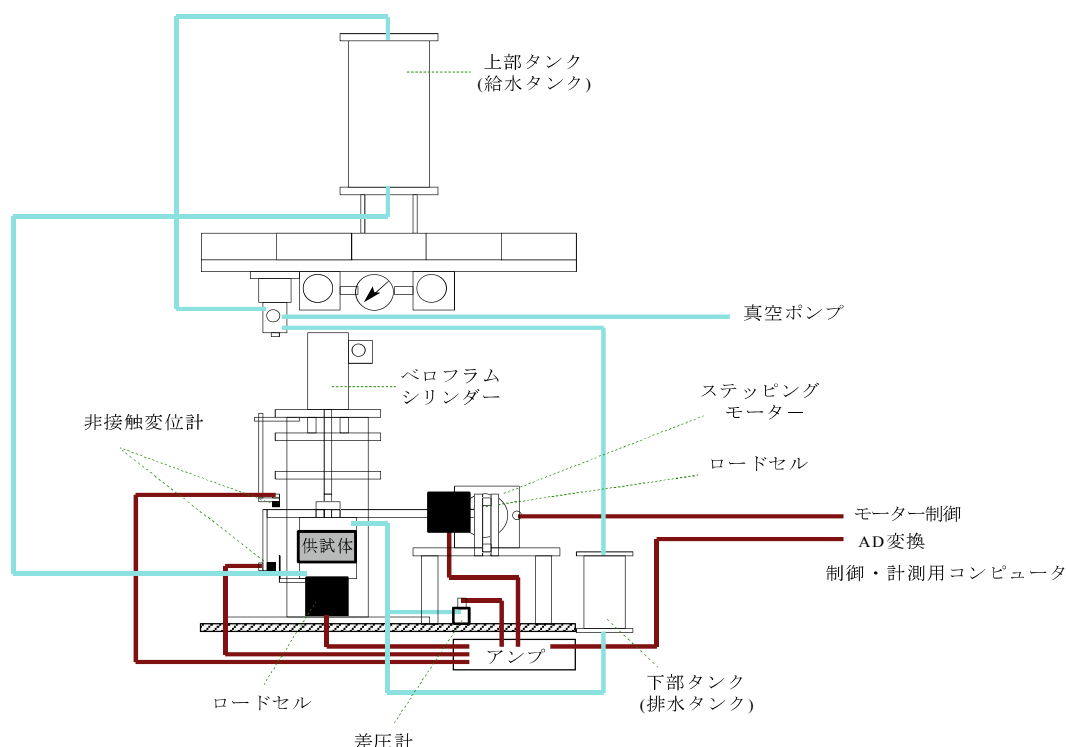


図 3.3.9 簡易直接せん断試験装置の概略および配管図

コンピュータにはステップモーターの制御を行うために高速 3 軸ステップモーター・コントロールボード“SMC-3(PC)”(CONTEC 社)が，計測データの A/D 変換を行うために高速高機能アナログ入力ボード“AD16-16(PCI)E”(CONTEC 社)が実装されている。ここで，制御に関しては，コンピュータによりモータドライバ用アンプを介してステップモーターを制御することで，供試体に与えるせん断変位を制御している。実験の载荷速度に関して考えると，粘性減衰に比べて履歴減衰が支配的な場合には実際の地震動のように高速駆動する必要はないが，粘性減衰を考慮すべき場合には実験

の載荷速度の検討が求められる。しかし、地震と同程度の載荷速度で要素試験を行うには高度な技術と高価なシステムが必要となる。本研究に関して述べると、ステッピングモーターの回転速度についてはステッピングモーター・コントロールボードを使用しているため試験制御・計測プログラムによって設定可能であるが、実験システムおよび実験精度の都合上実際の地震動と同程度の速度の設定は不可能である。そこで、本研究では実験システム、精度を考慮した上で、試験装置に見合った妥当な速度に設定を行っている。なお、その速度は供試体に与える変位量の大小により異なった速度としている(変位量が大きい時には速度を早く、小さい時には速度を遅くしている)。また、計測については鉛直荷重(計測器：鉛直荷重用ロードセル)、水平荷重(水平荷重用ロードセル)、供試体内部の等方圧(差圧計)、鉛直および水平変位(非接触変位計)が計測されているが、それぞれのデータは動ひずみ測定器(アンプ)を介してコンピュータで取得され、A/D変換が行われる。なお、本試験に用いている試験制御・計測プログラムは本年度より Visual Basic6.0により作成されたものを使用している。

(3) オンライン地震応答実験装置

本研究では、(1)および(2)で説明した簡易直接せん断試験装置を3台連結させた3連のオンライン地震応答実験装置を使用した。試験機の全景を写真3.3.2に示す。この試験装置は日下部らにより開発されたものであり、1995年に初代1号機が山口大学に持ち込まれ、兵動らにより盛土をモデルにしたオンライン地震応答実験が行われている^{32)~34)}。以後、拡張した形で1998年度より簡易単純せん断試験装置を3台連結させた3連のオンライン地震応答実験装置として始動した。試験装置の精度は、液状化に対する未改良砂と改良砂を対象にしたオンライン地震応答実験を実施し、試験機が実務的な問題に対して十分に適応可能なことを示している²⁹⁾。また、新たに作製された簡易直接せん断試験装置を用いた3連のオンライン地震応答実験システムにおける実験アルゴリズムの検証が藤井により行われている。



写真 3.3.2 3連オンライン地震応答実験装置の全景

3.3.4 実験アルゴリズム

実験アルゴリズムは日下部らの検証実験結果^{67),68)}を踏まえた上で、以下のように設定している。

- ① 地震応答解析により計算されたせん断ひずみが 1.0×10^{-4} に達するまでは、せん断前にオンライン地震応答実験装置により測定した初期せん断弾性係数 G_0 を用いた弾性計算を行う。
 - ② その間、供試体には弾性計算により算出されたせん断ひずみを付加させる。ただし、ひずみ増分が最小位置決め精度である 5.0×10^{-7} 以下の場合はステップモーターを不動とする。
 - ③ せん断ひずみが 1.0×10^{-4} に達した後、最初にせん断ひずみがゼロクロッシングした時点より、オンライン地震応答実験に移行する。
 - ④ 位置決め収束時の許容誤差は $\pm 5.0 \times 10^{-7}$ と微小なひずみとする。このように設定することにより、ひずみは極わずかながらオーバーシュートさせるようにした。ここで、オーバーシュートとは、計算で求めた目標ひずみ増分より大きな実ひずみを与えることをいい、オーバーシュートの逆の場合をアンダーシュートとする。このように必ずオーバーシュートさせるようにした理由は、アンダーシュート誤差が生じると、応力-ひずみ関係においてあたかもエネルギーが発生しているかのような働きをし、高次応答卓越現象が生じるとされており、この現象を避けるためである。この高次応答卓越現象の抑制効果に関する確認実験は日下部らにより行われている²⁴⁾。なお、位置決め収束時の許容誤差を $\pm 5.0 \times 10^{-7}$ と非常に小さなひずみに設定した理由は、オーバーシュートによる誤差力の補正を行わないためである。
- 以下、図 3.3.10 に実験アルゴリズムの概略フローを示す。

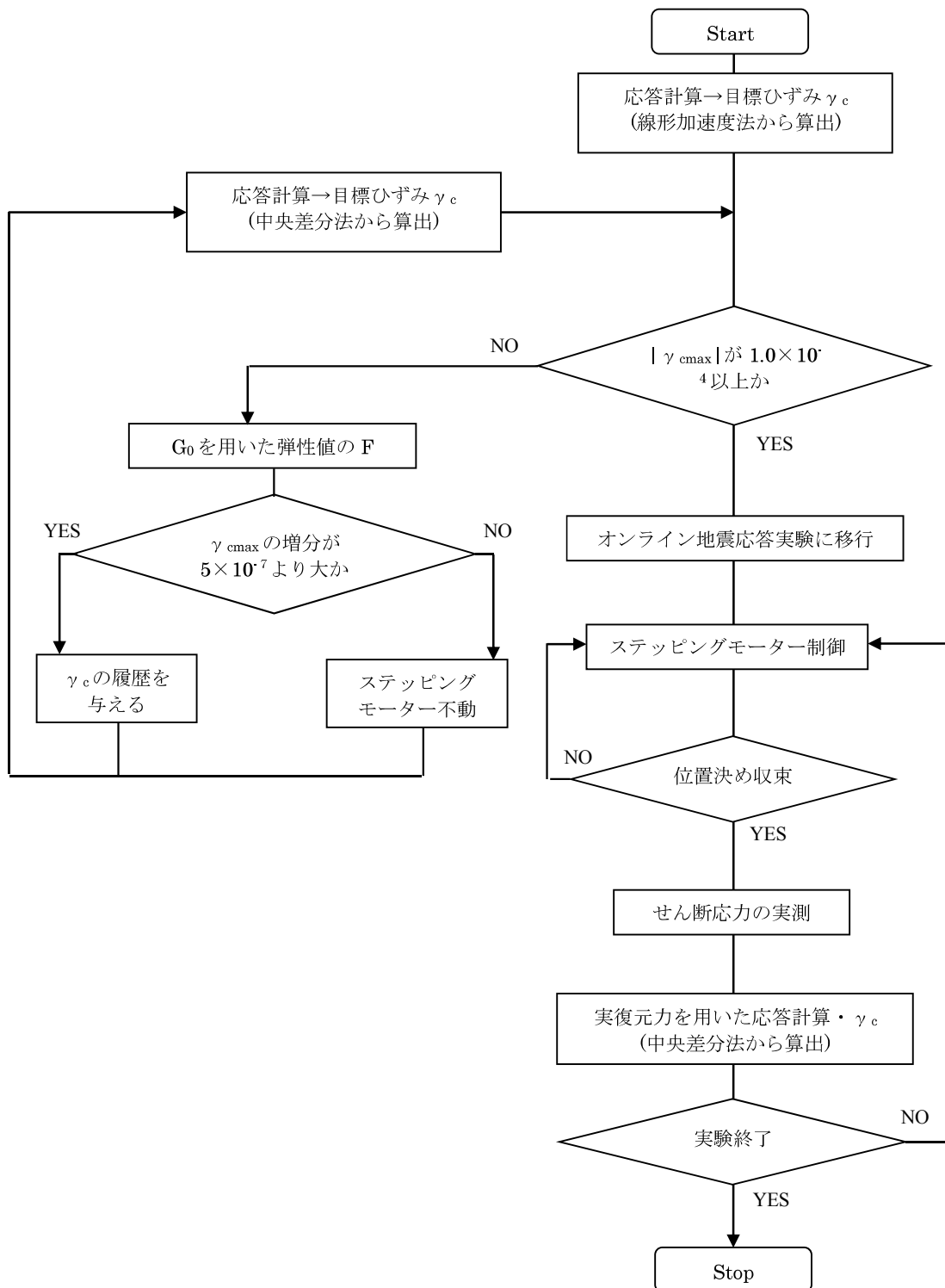


図 3.3.10 実験アルゴリズムの概略フロー

3.3.5 実験方法

本実験に於ける実験手順を以下に示す。

(1) 実験準備段階

- ① 供試体を飽和させるため、上部タンクの水を脱気する。
- ② 実験機の配管経路を通水することで、配管経路中の空気を追い出す。

(2) 実験条件入力

コンピューターで実験プログラムを立ち上げ、データの出力ファイル名、初期有効拘束圧、試料の物性値、入力加速度波形、実験層数、各々の層に於ける実験モデル（要素試験、非線形構成モデル）等の実験条件をあらかじめコンピューターに入力する。

(3) 供試体作製方法

(今川砂)

- ① 今川砂をビーカーに入れ脱気水を試料が浸るまで注ぐ。
- ② 試料を均等になるように混ぜる。
- ③ 上部、下部ペDESTALにグリスを均等に塗布する。
- ④ オンライン地震応答実験装置にセットしたモールド内に、常時 1 cm 水が存在する状態にし、スプーンで試料を投入する。
- ⑤ 細留分が沈下し、濁りが無い状態で余分な水分をスポイトで取り出す
- ⑥ 上部ペDESTALを載せメンブレンをかぶせる。
- ⑦ 拘束圧がもれないように上部、下部ペDESTALに O リングをつける。
- ⑧ 5kPa の負圧を作用させ供試体を自立させる。
- ⑨ 二重負圧法により供試体内を飽和させる。

(タイヤチップ)

- ① 上部、下部ペDESTALにグリスを均等に塗布する。
- ② オンライン地震応答実験装置にセットしたモールド内に、5層に分けて写真-3.5.1 に示すランマー（質量 110g、落下高さ 19cm）を用いて所定

の回数（1層 22回）突き固めて作製する。

- ③ 上部ペDESTALを載せメンブレンをかぶせる。
- ④ 拘束圧がもれないように上部，下部ペDESTALに O リングをつける。
- ⑤ 5kPa の負圧を作用させ供試体を自立させる。
- ⑥ 二重負圧法により供試体内を飽和させる。

(4) 圧密過程

- ① 供試体に，条件を満たす所定の圧密圧力になるよう異方圧密比を保ちながら徐々に応力载荷していく。
- ② 鉛直ひずみが一定になった時点で圧密を切り上げ，圧密終了とする。
- ③ 圧密後の供試体の直径，高さを測定し，コンピュータに入力する。

(5) 初期せん断弾性係数の測定（ G_0 測定）

- ① 単純せん断状態にて実験を行う際は，鉛直ひずみが発生しないように治具を用いて固定する。
- ② 供試体を非排水状態にしたのち，ステッピングモータを回転させて所定のせん断ひずみ($\gamma_0=0.005$)を与え，そのときのせん断応力(τ_0)を自動計測する。
- ③ $G_0 = \frac{\tau_0}{\gamma_0}$ により算出された G_0 を初期せん断弾性係数とする。

(6) せん断過程

- ① せん断応力をゼロセットし，この状態で初期値をとる。
- ② 軸方向に変位が生じないようにナットで固定する。
- ③ 排水パイプを閉め，非排水状態にする。
- ④ コンピュータにより実験をスタートさせる。せん断過程は 3.3.4 実験アルゴリズムに示したとおりである。ここで，実験終了の条件は，入力加速度波形が終了した時，もしくは非接触変位計の許容値を超えたときであり，自動的に終了となるシステムとなっている。繰返しせん断試験は片振幅せん断ひずみが 10%生じたら载荷を停止する。

3.3.6 地盤のモデル化⁶⁹⁾

地盤系オンライン地震応答実験システムでは、解析対象地盤を決定し、その断面に対してモデル化を行うことで実験を実施する。これは、オンライン地震応答実験のみならず、地震応答解析一般で通常になされていることである。ここで、解析対象となる地盤であるが、基盤では地震動の影響がさほどないと考えられていることから、基盤上部の表層部分を対象としている。解析対象地盤のモデル化に関して以下に述べる。

解析対象断面のモデル化には、まず、地震動を入力するための基盤面を設定する必要がある。基盤面としては平面的な広がりをもつ、その面以下の地層構成ならびに力学特性が類似していることが必要である。地震学で定義される基盤面は通常数千 m のオーダーとされているが、地盤の地震応答解析のために設定される工学的な基盤面は、通常数十 m のオーダーであるのが一般的である。ここで、地盤工学における実地盤に対する基盤面の決定法であるが、土質柱状図により決定する際は洪積地盤の上面、N 値分布に関しては砂質土層で N 値 50 程度以上、粘性土層で N 値 25 程度以上の剛性の高い地層の上面、PS 検層結果に基づく際はせん断弾性波速度(V_s)が 300m/s 程度以上である地層の上面を基盤面とする。このようにして基盤面を決定した後、基盤面から地表面の地盤をいくつかの層に分割する。分割は土の種類や硬さに応じて行い、均一な層なら分厚い層、めまぐるしく性質が変化するときには薄い層となる。層と層の境界では、土の種類や硬さが変化しているため不連続であり、この性質の不連続面は不整合と呼ばれる。そして、地震応答解析を行うにあたり、各々の層の土質に対応した地層特性、つまり単位体積重量や減衰定数、せん断弾性係数(本研究ではせん断前に測定する)を与え、層厚を考慮して有効拘束圧を決定する。また、対象断面は、集中質量法により多質点系に置き換えている。

なお、実際には不整合面において波の反射が起こる。波は境界に向かって垂直に入射し、不連続の度合いが著しいほど透過するエネルギーは小さく、反射エネルギーは大きい。これを実地盤に関して考えると、下方から入射した振動エネルギーが層境界で反射され、地表に届きにくいことを意味する。

また，不整合面での反射により，逸散減衰の考慮も必要とされるが，本研究では反射，逸散減衰に関しては考慮していない。

3.3.7 本研究での非線形構成式におけるモデルパラメータの決定法

本研究では、ハイブリッド・サブストラクチャ法を採用しているため、解析対象モデルに非線形構成式を用いて応力-ひずみ関係を求める層(解析層)を有する。その解析層には3.3.2(4)で述べた修正 Ramberg-Osgood モデル⁶⁵⁾を適用しているが、ここでは本研究におけるモデルパラメータの決定法について説明する。

修正 Ramberg-Osgood モデルの骨格曲線は次式で表された。

$$\tau = \frac{G_0 \gamma}{1 + \alpha \left| \frac{\tau}{\tau_f} \right|^{\beta-1}} \quad (3.3.30)$$

ここで、このモデルのパラメータは初期せん断弾性係数 G_0 、せん断強度 τ_f 、物質定数 α 、 β の4つである。これらのパラメータを決定するに先がけ、実験対象地盤ボーリング柱状図を参考にして、地盤をモデル化し各層に於ける粘着力 C 、破壊ひずみ γ_f 、減衰定数 h_{max} を各土層の土質条件に見合うように設定する。内部摩擦角 ϕ については、ボーリング N 値と大崎によって得られた式⁷⁰⁾(3.3.31)によって算出する。

$$\phi = \sqrt{20N} + 15 \quad (3.3.31)$$

ここで、初期有効上載圧 σ'_v に関しては、対象地盤モデルに於ける各層の単位体積重量および層厚により決定される値である。

以上によって得られた C 、 γ_f 、 h_{max} 、 N 値、 ϕ を用いて、修正 Ramberg-Osgood モデルに用いられるパラメータ (G_0 ⁷¹⁾、 τ_f 、 α 、 β ⁶⁵⁾)を (3.3.32)～(3.3.35)式によりそれぞれ決定した。

$$G_0 = 98 \left(144N \right)^{0.68} \quad (3.3.32)$$

$$\tau_f = c + \sigma'_v \tan \phi \quad (3.3.33)$$

$$\beta = \frac{2 + \pi h_{\max}}{2 - \pi h_{\max}} \quad (3.3.34)$$

$$\alpha = 2^{\beta-1} \quad (3.3.35)$$

なお，オンライン地震応答実験のうちの要素試験部分に於ける初期せん断弾性係数 G_0 は，供試体圧密後に微小ひずみ ($\gamma_0 = 0.005$) を作用させ，その時に計測されたせん断ひずみ (τ_0) を用いて次式により求めている．

$$G_0 = \frac{\tau_0}{\gamma_0} \quad (3.3.36)$$

3.4 オンライン地震応答実験結果

第2章までに述べた単調および繰返し三軸試験や動的変形試験の結果から、タイヤチップは液状化を起こす材料ではなく、過剰間隙水圧の上昇を抑制する効果を持つことが確認された。これらの特性を、飽和砂地盤上の戸建住宅基礎地盤に適用し、地震時の液状化および応答の低減効果について、せん断による地盤材料の間隙水圧の上昇に伴う有効応力の変化および材料の非線形も考慮でき、液状化過程まで扱える手法であるオンライン地震応答解析にて検討した。

3.4.1 実験解析に用いた試料

実験試料には、東北地方太平洋沖地震で甚大な被害が起きた千葉県浦安市今川地区の液状化被害宅地から採取した砂質土（以後、今川砂と呼ぶ）を用いた。写真3.4.1は、採取現場の写真であり、噴砂を伴う液状化により15cm程度不同沈下したアパートの沈下修正工事中の建物基礎下から採取した。写真3.4.2は、その採取した今川砂である。表3.4.1には試料の物理的性質を、図3.4.1には、試料の粒度分布を比較のため、豊浦標準砂と共にそれぞれ示す。なお、この採取現場は、図3.4.2に示す通りで、後述するオンライン地震応答解析にて入力波として用いたK-NET浦安(CHB008)地震波観測地点とわずか1km強の距離であった。

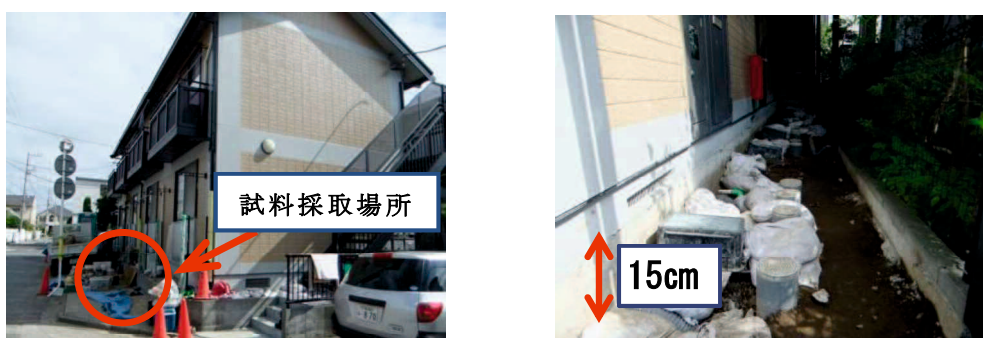


写真 3.4.1 今川地区液状化による不同沈下現場（試料採取場所）

表 3.4.1 試料の物理的性質

試料	今川砂	豊浦標準砂
細粒分含有率: F_c (%)	42	0
粒子密度: ρ_s (g/cm ³)	2.525	2.635
最大密度: ρ_{dmax} (g/cm ³)	1.403	1.645
最小密度: ρ_{dmin} (g/cm ³)	1.018	1.335
最大間隙比: e_{max}	1.480	0.973
最小間隙比: e_{min}	0.800	0.635

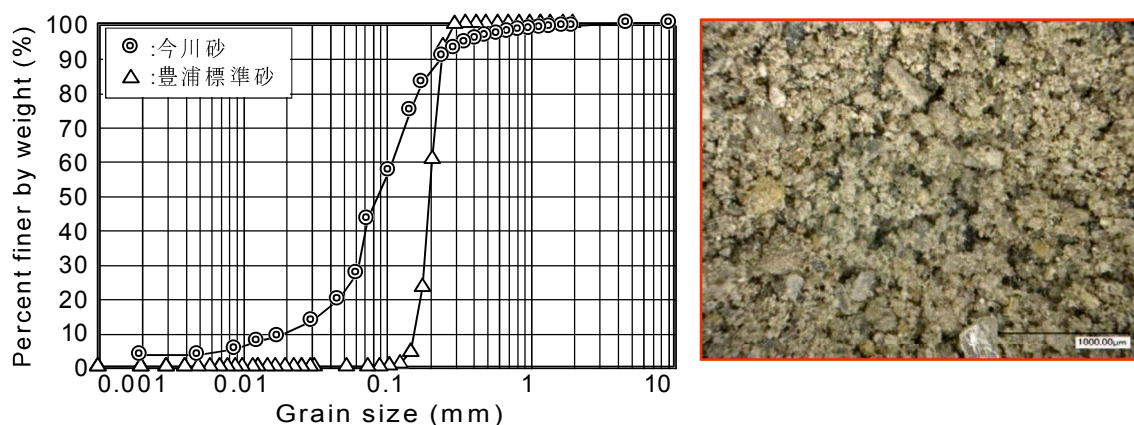


図 3.4.1 試料の粒径加積曲線

写真 3.4.2 今川砂

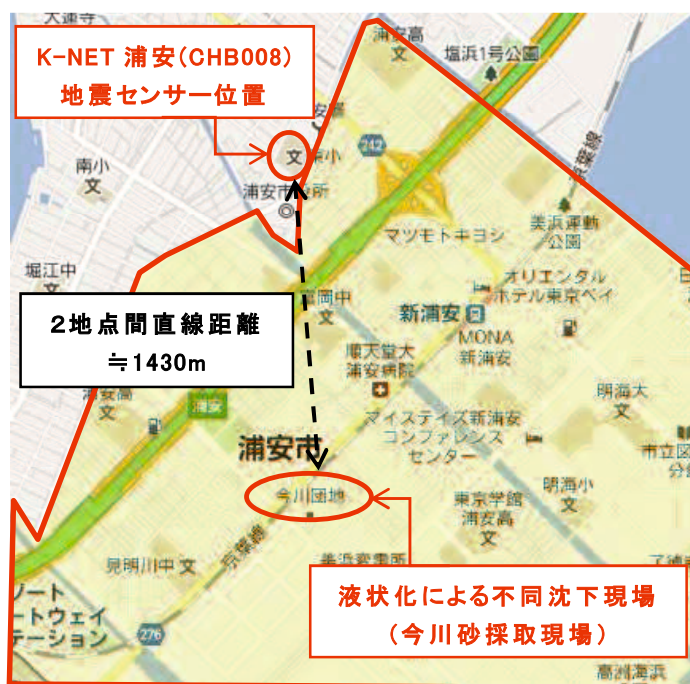


図 3.4.2 今川砂採取場所位置

タイヤチップ試料についての物理的性質ならびに粒度分布に関しては、前章にて既述した表2.2.1と図2.2.1に示す通りであり、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である。また図3.4.3は、実験に用いた今川砂ならびに比較参照のための豊浦標準砂について、非排水繰返し三軸試験より求めた両振幅ひずみが、 $\varepsilon_{DA}=5\%$ に至るのに必要な繰返し応力比 $\sigma_d/2\sigma'_c$ と繰返し回数 N の関係を示したものである。

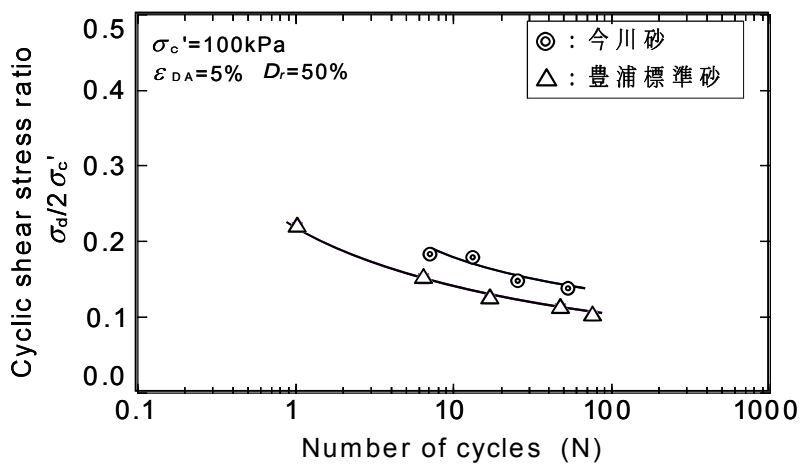


図 3.4.3 繰返し強度曲線

3.4.2 実験用地盤モデルならびに実験条件

実験解析用想定地盤モデルを図3.4.4に示す。前節3.4で既述しているように、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。

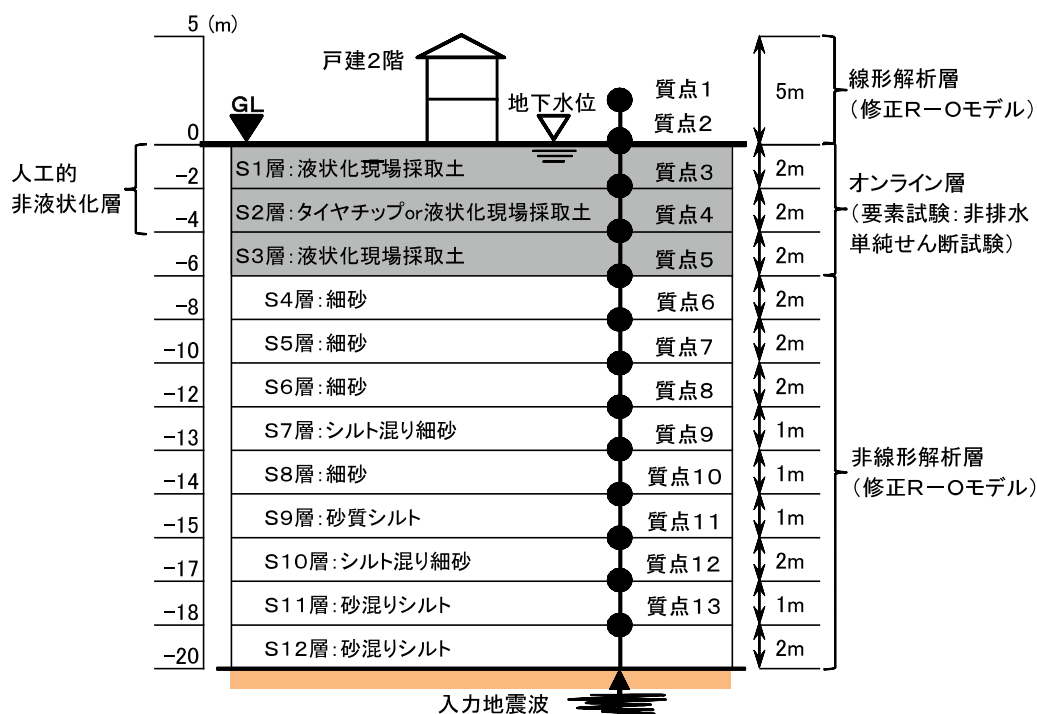


図 3.4.4 実験用想定地盤モデル

前節で既述した要領にて、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、3連の単純せん断試験機を用い、図3.4.4のように実験用想定地盤を多質点系にモデル化し、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。次に想定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ことで、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。なお、運動方程式を数値的に積分して解を定めていく数値積分法に関しては、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⁶³⁾。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。ここで、粘性減衰については解析の安定性のために試行錯誤により最低の値を与えた。レーリー減衰を導入し、質量比例型の係数については $\alpha=0$ とし、剛性比例型の係数 β のみを考慮した。 β の値は対象とする多層地盤を等価な均一様地盤として、1/4波長則に基づいて地盤の1次固有振動数を求め、砂地盤の初期減衰定数 $h_0=0.02$ として算出し、 $\beta=0.004$ を設定した。本システムの要素実験部分は、日下部ら²⁹⁾により開発された簡易単純せん断試験機を用いている。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。ただし、多層からなる地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図3.4.4に示す地表面付近の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。

表 3.4.2 実験ケース

層分割	実験ケース	
	未改良地盤モデル	改良地盤モデル
S 1	液状化今川地区砂系採取土	液状化今川地区砂系採取土
S 2	液状化今川地区砂系採取土	タイヤチップ
S 3	液状化今川地区砂系採取土	液状化今川地区砂系採取土
S 4～S 1 2	飽和解析層	飽和解析層

} オンライン層

実験解析ケースは、未改良時としてオンライン層全てを今川砂とした場合と、改良時としてオンライン層のうちS2層のみをタイヤチップとした場合の2ケースを考え、表3.4.2に示す通りである。

表 3.4.3 未改良ケース時解析パラメータ

層No.	層厚(m)	湿潤単位体積重量 γ_t (kN/m ³)	せん断強度 τ_f (kPa)	初期せん断剛性 G_0 (MPa)	修正R-Oパラメータ	
					α	β
S0	5	2.35	—	11.77	1	1
S1	2	16.70	オンライン：今川砂		—	—
S2	2	16.70	オンライン：今川砂		—	—
S3	2	16.70	オンライン：今川砂		—	—
S4	2	18.00	25.73	29.79	1.98	1.98
S5	2	18.00	32.61	29.79	1.98	1.98
S6	2	18.00	44.89	44.98	1.98	1.98
S7	1	18.00	44.64	29.79	1.98	1.98
S8	1	18.00	65.76	72.07	1.98	1.98
S9	1	18.00	47.97	22.61	1.98	1.98
S10	2	18.00	56.67	29.79	1.98	1.98
S11	1	18.00	57.57	22.61	1.98	1.98
S12	2	18.00	62.37	22.61	1.98	1.98

表 3.4.4 改良ケース時解析パラメータ

層No.	層厚(m)	湿潤単位体積重量 γ_t (kN/m ³)	せん断強度 τ_f (kPa)	初期せん断剛性 G_0 (MPa)	修正R-Oパラメータ	
					α	β
S0	5	2.35	—	11.77	1	1
S1	2	16.70	オンライン：今川砂		—	—
S2	2	11.27	オンライン：タイヤチップ		—	—
S3	2	16.70	オンライン：今川砂		—	—
S4	2	18.00	21.18	29.79	1.98	1.98
S5	2	18.00	28.05	29.79	1.98	1.98
S6	2	18.00	39.72	44.98	1.98	1.98
S7	1	18.00	40.09	29.79	1.98	1.98
S8	1	18.00	59.53	72.07	1.98	1.98
S9	1	18.00	43.73	22.61	1.98	1.98
S10	2	18.00	52.12	29.79	1.98	1.98
S11	1	18.00	53.33	22.61	1.98	1.98
S12	2	18.00	58.13	22.61	1.98	1.98

修正R-Oモデルの解析パラメータにはそれぞれ、表3.4.3, 表3.4.4に示す値を設定しており、既述の3.3節3.3.7項(3.3.32)式～(3.3.35)式より決定した。なお、図3.4.4に示す想定地盤モデルは、千葉県地質環境インフォメーション⁷²⁾より今川砂採取住所近隣データを参考に想定しており、得られたN値情報より、Imai and Tonouchiら⁷¹⁾の式(3.3.32)から初期せん断剛性 G_0 は算定した。また砂質土の減衰定数 h_{max} は0.21とし⁷³⁾、 β は算定した。そして入力加速度は、K-NET⁷⁴⁾浦安(CHB008)地表面観測波を、基盤をGL-20mにある剛基盤として想定し入力した。但し入力波としては、図3.4.5に示すK-NET浦安波0s-300sの経時データのうち主要動の前半を含む30s-130sの経時データ100秒間を用いた。入力波に100秒間しか用いなかったのは、単に使用したコンピュータのデータ許容量の限界によるものである。

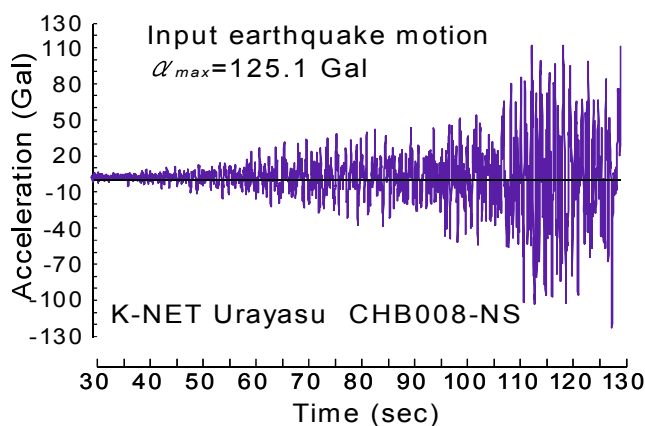


図 3.4.5 入力加速度波形

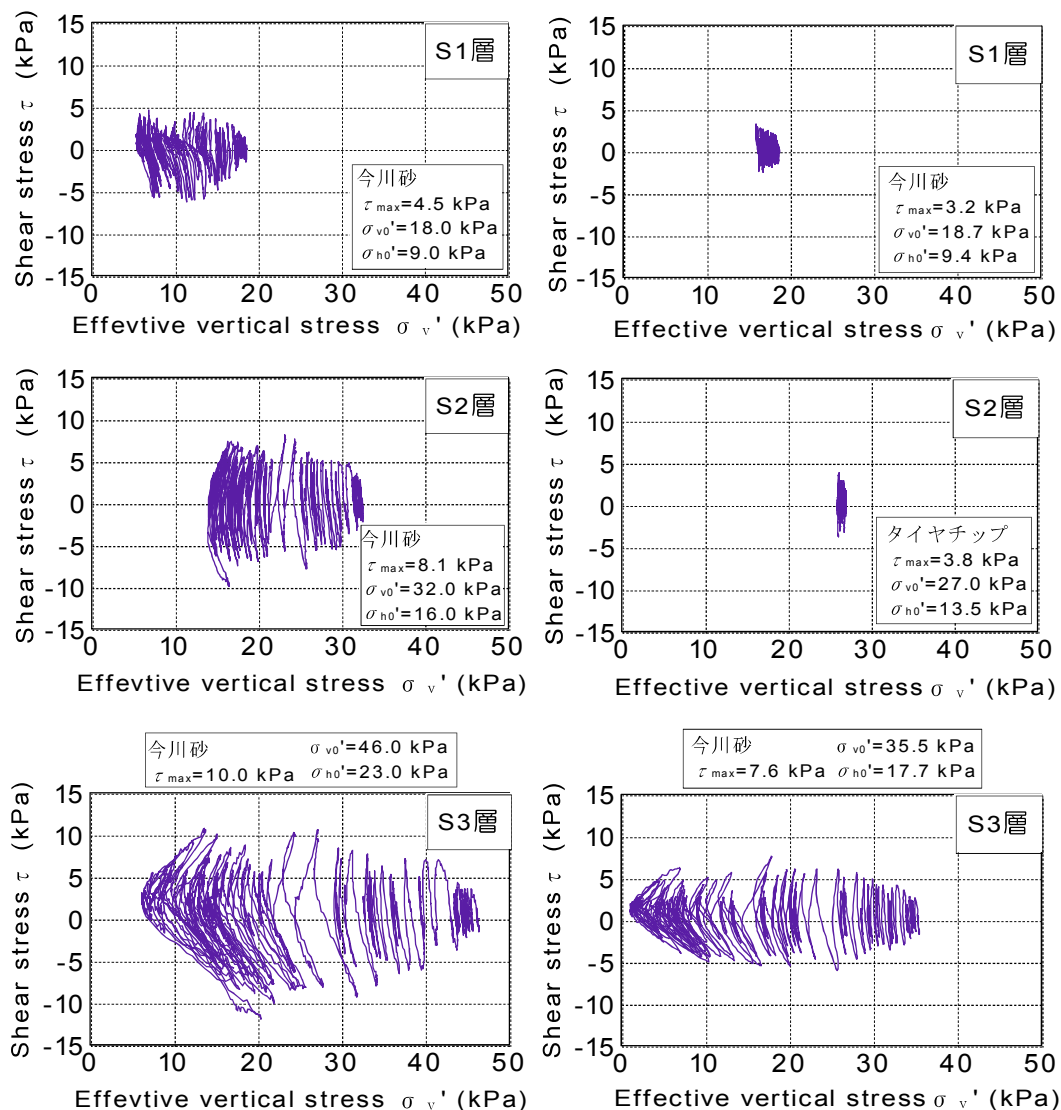
本研究におけるオンライン地震応答実験・解析で確認したい優先事項は、地盤材料工学的見地から未改良地盤では液状化が生じている戸建住宅基礎下地盤に、タイヤチップを用いた場合に液状化ならびに応答の低減効果を評価・確認できるかである。本研究当初は、先ず地震工学的見地からオンライン地震応答解析にて、東北地方太平洋沖地震で液状化被害が甚大であった千葉県浦安市今川地区の宅地での液状化を再現することを試みたが、既述しているように今川砂は、細粒分含有率が $F_c=42\%$ と高く、また繰返し強度が、豊浦標準砂より高いことや、本来、今川地区の基盤はGL-40m程度に位置し、K-NET

浦安地表面観測波を重複反射理論に基づき、基盤まで戻しても入力加速度は小さくなり、この値を基盤入力しても未改良地盤モデルケースにおいて、地表面に液状化の兆候が確認できなかったため、こういった実験解析条件で対応した。供試体寸法は、直径6cm、高さ4cmの円筒であり、今川砂は細粒分含有率が高く飛散するので、水中落下法にて作製した。供試体の初期状態の物性値は、乾燥密度が $\rho_d=1.180 \text{ g/cm}^3$ であり、間隙比が $e=1.140$ (相対密度 $Dr=50\%$)程度となるように、タイヤチップは突固め法により作製し、乾燥密度が $\rho_d=0.521 \text{ g/cm}^3$ であり、間隙比が $e=1.260$ 程度となるように突固めた。便宜上、これを今川砂と同様に相対密度で仮に表現すると、相対密度が $Dr=130\%$ になるように突固めたことになる。

3.4.3 実験結果

(1) 有効応力経路およびせん断応力-せん断ひずみ関係

図3.4.6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3.4.7である。



(a) 未改良地盤モデル

(b) 改良地盤モデル

図 3.4.6 有効応力経路

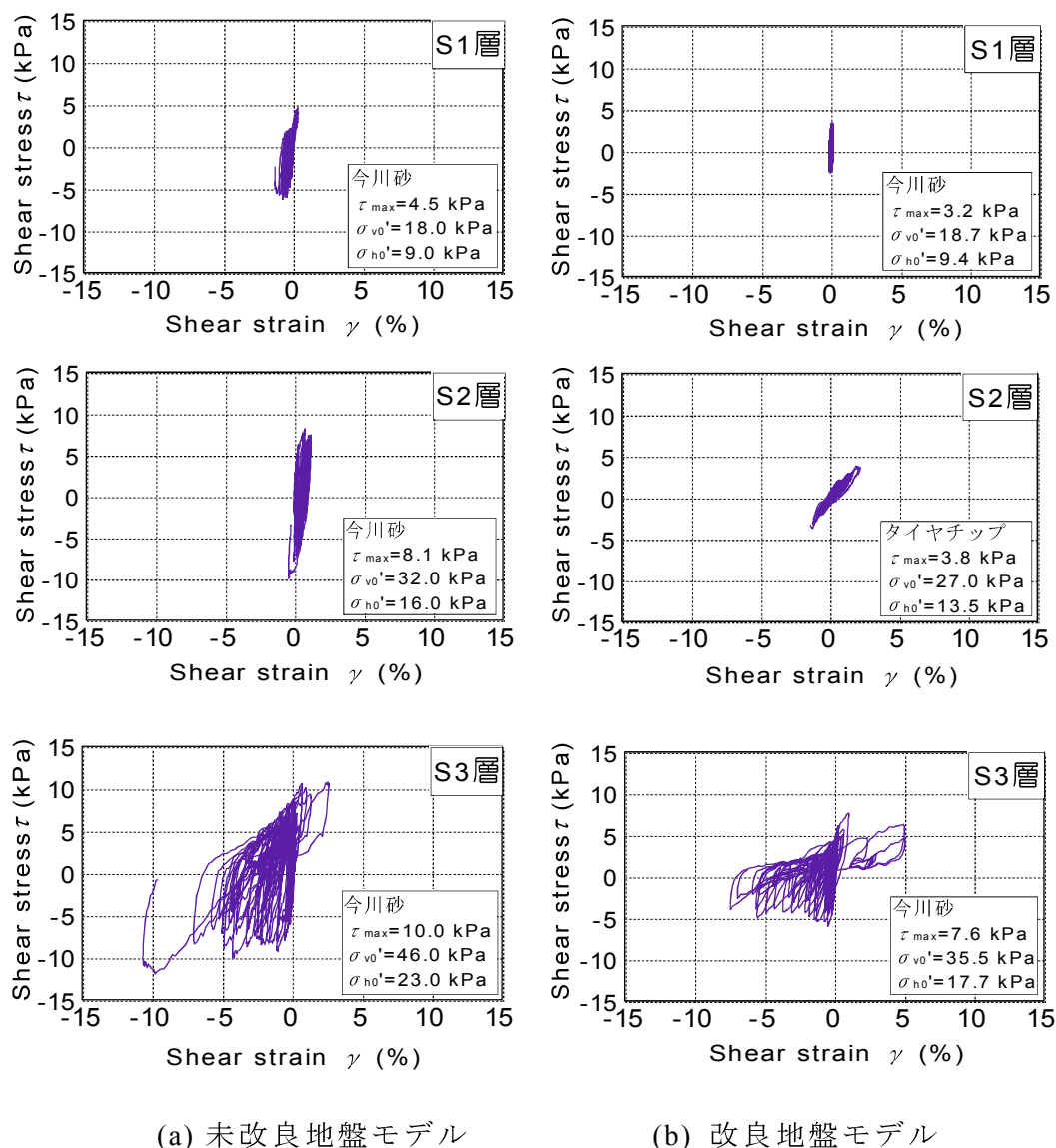


図 3.4.7 セン断応力-せん断ひずみ関係

S3層は両ケースとも大きく有効応力が減少し、せん断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の兆候に至っていることが確認できる。ここで液状化の兆候とは、有効応力が0の状態には到達していないが、過剰間隙水圧が蓄積し有効応力が0へと漸近する状態を指している。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、地震動が伝搬しづらくなり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、液状化に近い状態に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、ほぼ線形の関係にあることが判る。また、タイヤチップは剛性が低いため、せん断ひずみが最初から大きく発生はするものの、繰返しせん断により発達することはなく、この傾向は、前述の単調および繰返し三軸試験結果と対応している。

(2) 過剰間隙水圧時刻歴

図3.4.8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。

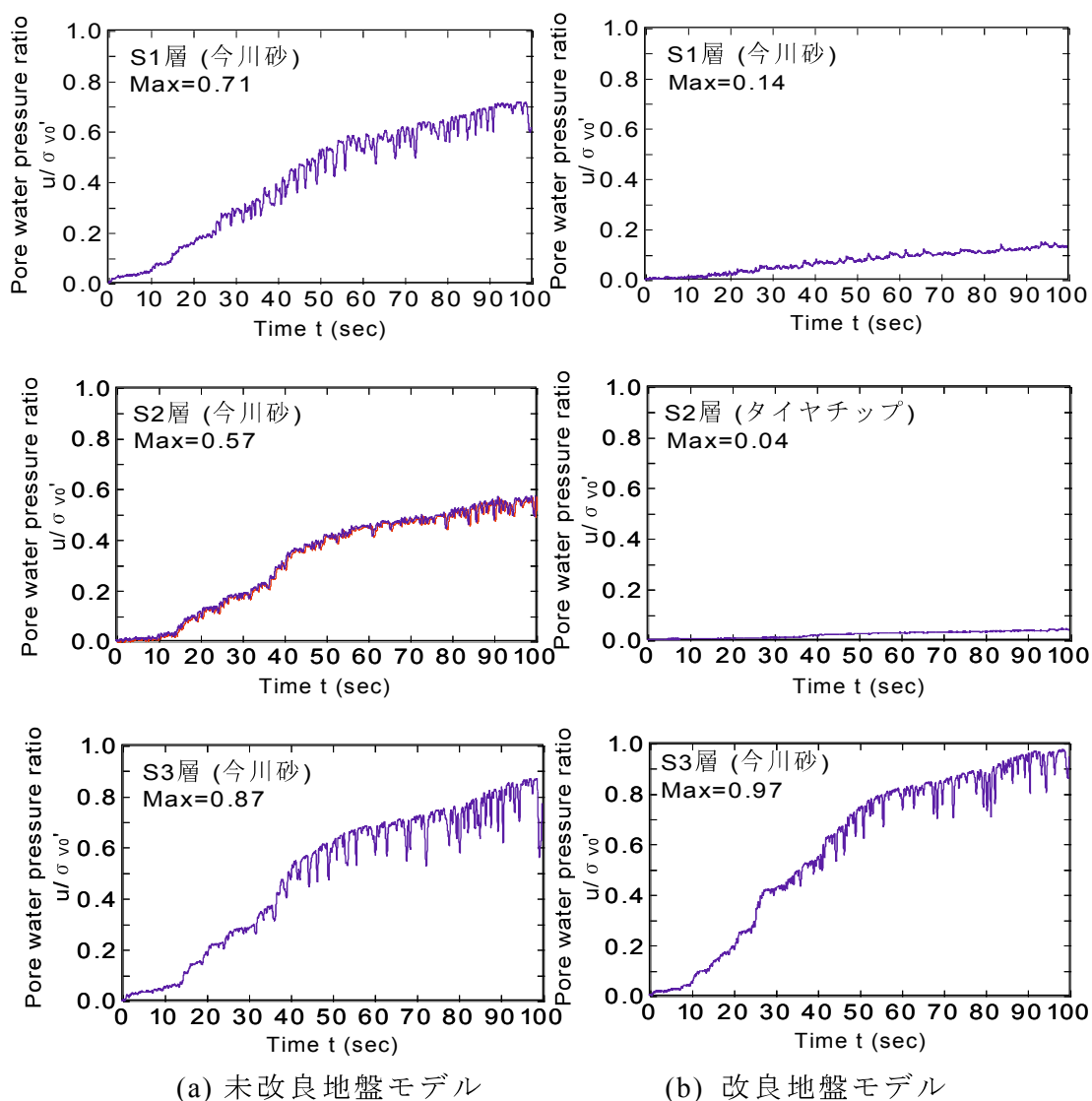
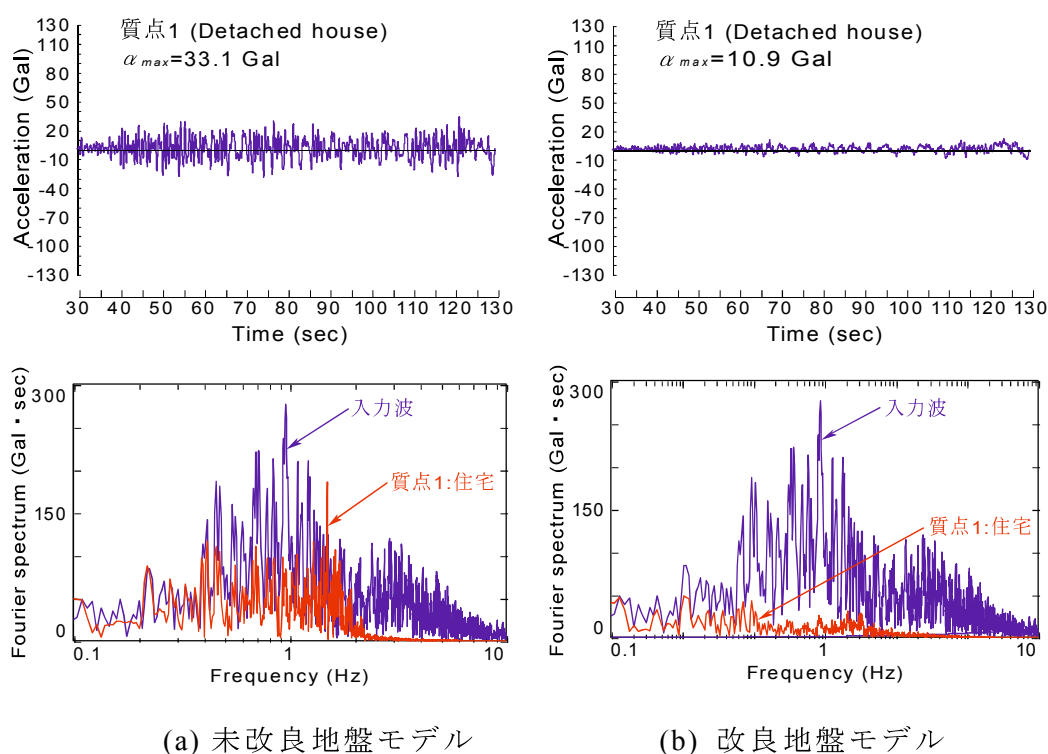


図 3.4.8 せん断応力-せん断ひずみ関係

図3.4.6の有効応力経路と見比べると、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。今回入力波としては、図3.4.5に示すK-NET浦安波0s-300sの全観測データのうち主要動の前半を含む30s-130sの経時データ100秒間のみを用いたため、まだ上昇すると見て取れる間隙水圧の上昇が途中で終わっており、実験解析結果に一部影響は出ているものの、液状化挙動は捉えられていると考える。改良地盤モデルの場合、タイヤチップ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、このタイヤチップ改良層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、わずかに発生するに留まっており、結果的に地表面下GL-2~4mの改良で、人工的非液状化層を地表面下4mまで構築できていることを確認できる。

(3) 加速度時刻歴および加速度フーリエスペクトル

図3.4.9は図3.4.4に示す実験用想定地盤モデルにおいて、図3.4.5に示す入力加速度波で100秒間オンライン地震応答解析を実施した際の質点1（住宅）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。なお加速度フーリエスペクトルについては、加速度の周波数成分変化が大きい周波数領域0.1～10Hz間について示している。



(a) 未改良地盤モデル

(b) 改良地盤モデル

図 3.4.9 質点 1（住宅）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、住宅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、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、振動全体が低減されていることが見て取れ、この事象が起因し、質点1における応答加速度のオールパス値（周波数範囲全体の加速度成分の大きさ）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、住宅への伝搬加速度は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、せん断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、タイヤチップのせん断剛性は、前述したとおり有効拘束圧の影響を受けているが、その値は非常に小さく、砂の約1/100程度であり（第2章2.4節図2.3.10参照）、せん断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。質点1での最大応答水平変位は、未改良地盤モデルの場合で25cm程度であったが、タイヤチップ改良地盤モデルの場合で15cm程度に低減されており、タイヤチップによる応答低減の効果を反映している。

3.5 振動台模型実験による液状化防止効果の検証

オンライン地震応答解析では、解析対象地盤を1次元の質点系に置換していること、1次元としての主要なせん断波の伝播特性については評価出来たと考えられる。しかし、実地盤では周囲に地盤が存在するため、変位が抑制されることや加振方向が増えることの影響が予想され、周辺地盤の影響を考慮していない問題が残る。そこで、本研究におけるタイヤチップ地盤改良の概念図(図1.4.1)をイメージして、図3.5.1に示すような地盤改良概念で、イギリス・ブリストル大学にてバタチャリア博士指導のもと、1G場振動台模型実験を実施し、液状化防止効果を評価・確認した⁷⁵⁾。

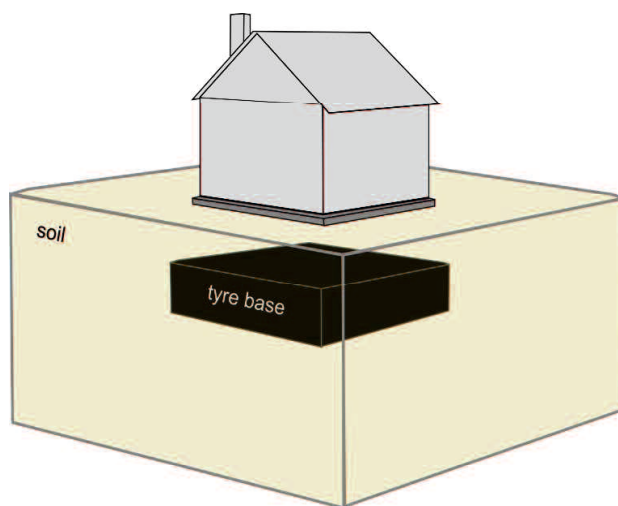


図 3.5.1 振動台模型実験時の地盤改良概念図

3.5.1 実験概要

(1) 1G 場振動台

1G 場振動台模型実験は、イギリスのブリストル大学工学部の地震・大型構造物実験棟 (EQUALS) にて実施した。写真 3.5.1 は振動台外観である。3 軸 6 自由度すべての方向への加振が可能である。振動台の大きさは 3m×3m であり、積載重量は最大 15 t である。振動台は最大加速度が水平方向で 3.7G、垂直方向で 5.6G まで再現することができる性能を持っている。

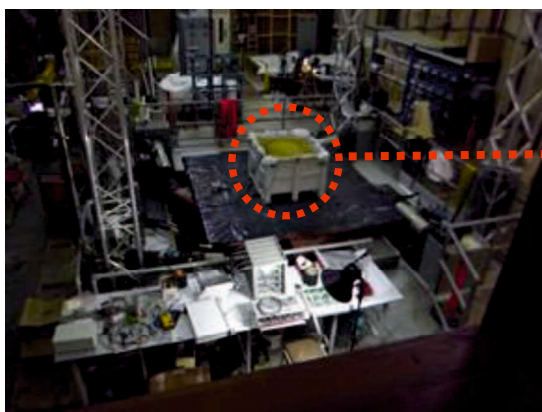


写真 3.5.1 振動台全景

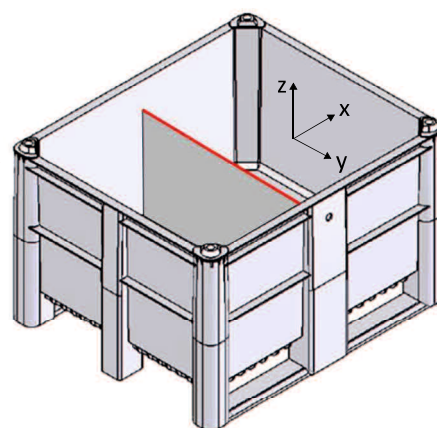


図 3.5.2 模型土槽と加振方向

模型土槽は強化硬質プラスチック製であり，図 3.5.2 に示すような外観であり，その大きさは，1120mm×920mm×600mm であり，本実験では中央に木製の板で仕切り，この土槽内に条件の異なる模型地盤（タイヤチップ地盤改良がある場合とない場合）を構築し，同時に加振し，その違いを検証する．

(2) 模型地盤の構築

模型地盤は Redhill 110 と呼ばれる珪砂と筆者らが日本で用いたものに似たタイヤチップにて構築しており，その物理的性質は表 3.5.1 と表 3.5.2 に示す通りである．

表 3.5.1 タイヤチップの物理的性質

Material	D_{50} (mm)	e_{min}	e_{max}	γ_{dmin} (kN/m^3)	γ_{dmax} (kN/m^3)
Tire Chips	2.45	1.600	2.320	35.00	45.00

表 3.5.2 Redhill 砂の物理的性質

Material	D_{50} (mm)	e_{min}	e_{max}	γ_{dmin} (kN/m^3)	γ_{dmax} (kN/m^3)	Φ ($^{\circ}$)
Redhill 110	0.12	0.547	1.037	12.76	16.80	36

Redhill 砂は，空中落下法にて相対密度 45%程度になるようにして模型地盤を作成した．タイヤチップは粒径 1~2mm 程度（写真 3.5.2）であり，タイヤチップにて地盤改良層を構築する際は，変形が出たり砂と混ざってしまうの

で、細かい穴の開いたビニール袋で包んだ状態で砂地盤中に設置した。(写真 3.5.3) 模擬地盤の作成は4層に分けて行い、下からそれぞれ 150mm, 66.7mm, 83.3mm, 50mm である。



写真 3.5.2 実験に用いたタイヤチップ 写真 3.5.3 タイヤチップを詰めた穴あきビニール

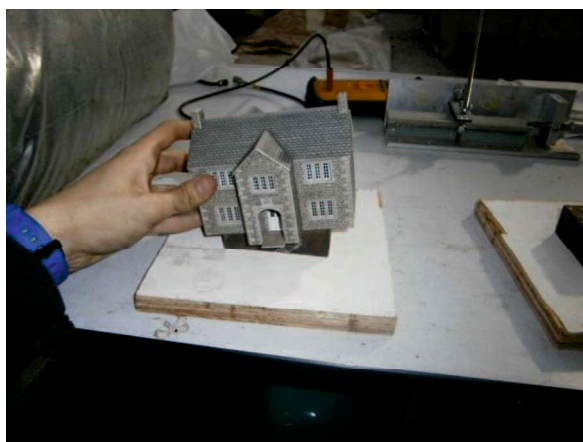


写真 3.5.4 実験に用いた模型家屋と基礎スラブ

タイヤチップを用いた際は、下から2層目を作成後その上にタイヤチップ層を 66.7mm 設けた。また、模擬地盤作成の際、水圧の変化を計測するため間隙水圧計(PPT)と、加速度測定のため加速度センサー(Acc)を土槽および砂中に図 3.5.3 のように設置した。模擬地盤作成後、上部より水を注入し、地盤の表面が浸潤状態となったところで飽和状態とした。その後模擬家屋を作成した地盤に設置した。模擬家屋の基礎スラブは木材板(200mm×200mm×20mm)を

使い、家屋には 0.6kg のスチール版を 2 枚貼り付け総重量 2.0kg とした（写真 3.5.4）。

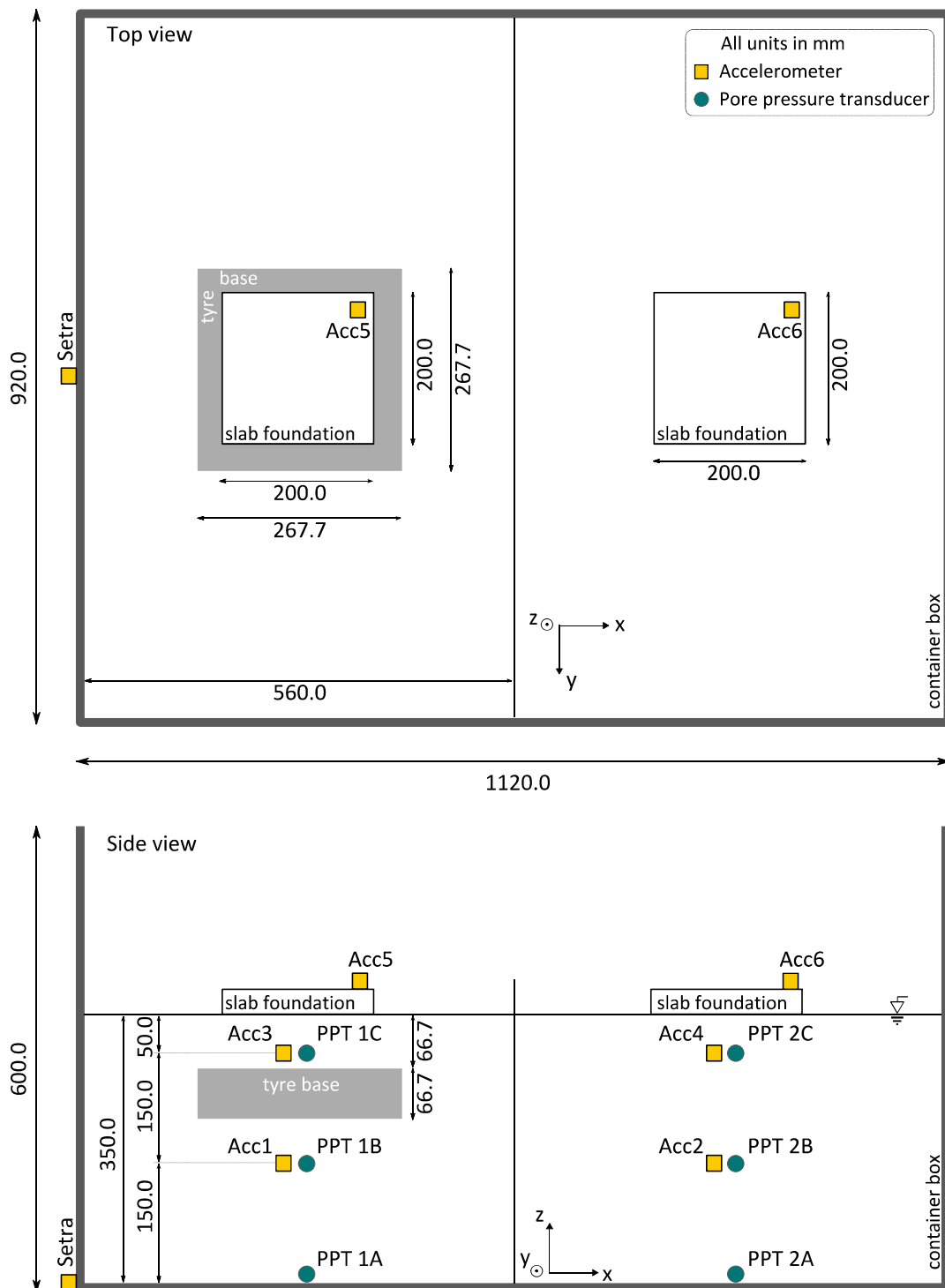


図 3.5.3 土槽内模型地盤における間隙水圧計(PPT)および加速度計(Acc)設置状況

実験に用いた地震波形は、80Hz までの周波数成分を含むホワイトノイズと 2011 年 2 月 22 日にニュージーランドで発生した M6.1 のカンタベリー地震の際にクライストチャーチで観測された波形の 40% で加振し、最後に非現実的ではあるが第 2 波としてクライストチャーチ観測波 100% で加振した。

3.5.2 実験結果と考察

(1) ホワイトノイズ波で加振した場合

実際の地震波を地盤モデルに与える前に、80Hz までのホワイトノイズを与え、タイヤチップ地盤改良を施している場合と施していない地盤モデルに対して同時に与えた場合、その応答加速度ならびに地盤卓越振動数の変化の差

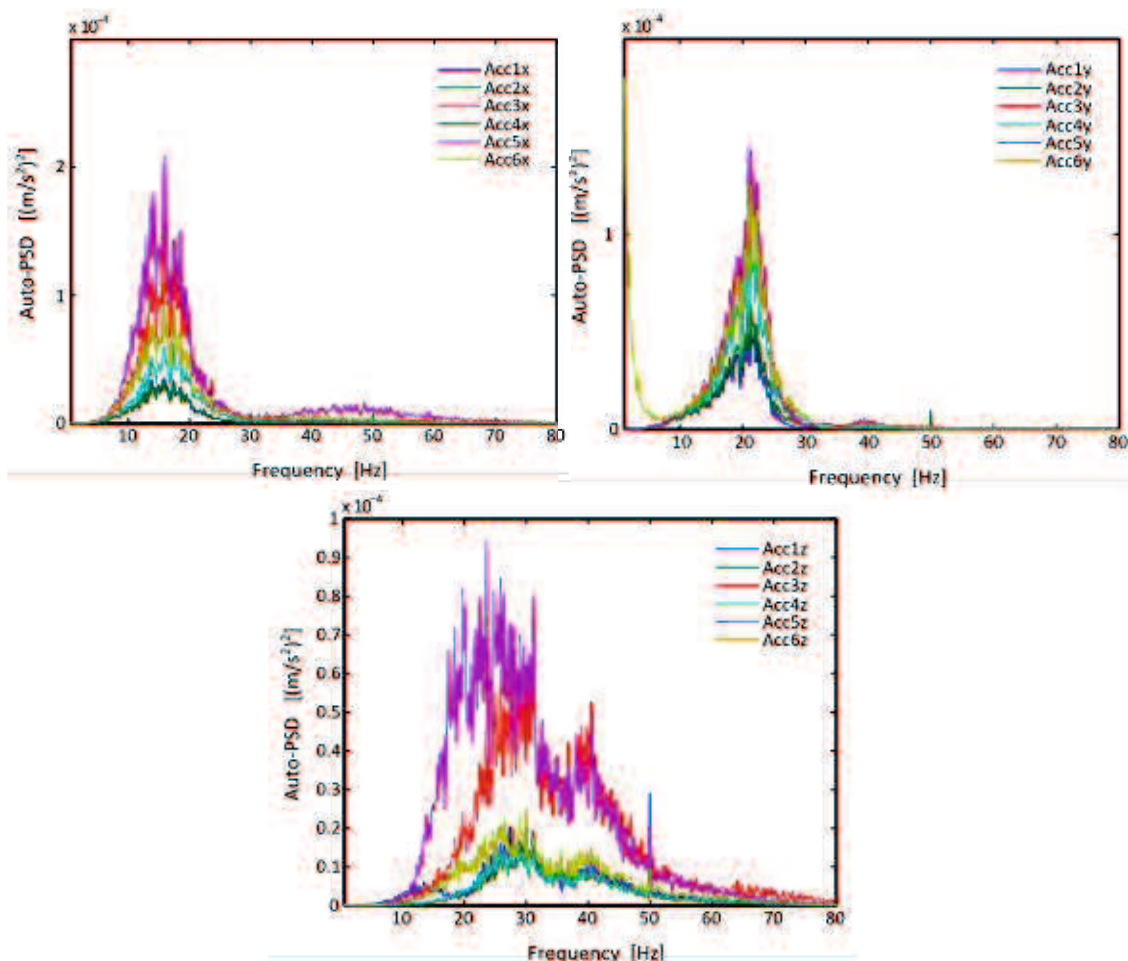


図 3.5.4 ホワイトノイズに対する各測点 XYZ 方向別加速度スペクトル

異を確認した。図 3.5.4 は、ホワイトノイズに対する各測点（図 3.5.3 におけるタイヤチップ敷設側：Acc1, Acc3, Acc5 と未改良側：Acc2, Acc4, Acc6）上の XYZ 方向別加速度パワースペクトルである。

実験当初、基礎スラブ下地盤に低剛性弾性体であるタイヤチップ層改良層があることにより、家屋固有振動数より低い振動数域で応答することを期待した。また、このタイヤチップ層による地盤剛性の軟化効果は、タイヤチップによるバネ効果が Z 方向で顕著に現れるものと予想していた。結果的には、図 3.5.4 より、水平 XY 方向では、その応答振動数帯域に差異はないが、鉛直 Z 方向は、タイヤチップ改良層がある方がやや、応答振動数帯域が下がっていることが見て取れる。また、各測点における加速度パワースペクトルの最大値は、全ての方向において、 $Acc1 \approx Acc2$, $Acc3 > Acc4$, $Acc5 > Acc6$ なる傾向となっており、タイヤチップ層上の未改良地盤と基礎スラブ上では、オンライン地震応答実験結果とは異なり増幅傾向を示している。この事象はタイヤチップをビニール袋に入れたことにより、タイヤチップの剛性が上がったことに起因するものではないかと推測する。

(2) クライストチャーチ 40%地震波で加振した場合

実際の観測波であるクライストチャーチ 40%地震波を加振した場合の動的特性を調べた。図 3.5.5 は、XY 方向の入力加速度の時刻歴と、図 3.5.3 に示す地盤モデルの未改良地盤モデルとタイヤチップ地盤改良モデルに於ける、土槽底から 0cm(PPT1,2A), 15cm(PPT1,2B), 30cm(PPT1,2C)の位置での過剰間隙水圧比の時刻歴を示す。PPT2C に於いては最も、過剰間隙水圧比が上昇し、1 に達しており、液状化が生じていることが見て取れる。また加振を初めて 16 秒後に各測点に於いて、深さ方向に拘束圧の影響を受けつつも過剰間隙水圧比が、最も大きな値になっている。これに対し、PPT2C と同じ深度のタイヤチップ層がある地盤モデルの測点(PPT1C)では 0.4 程度であり液状化に至っていないことを見て取れる。加えて、タイヤチップ層下の未改良地盤位置 PPT1B における過剰間隙水圧比よりも、タイヤチップ層上の未改良地盤位置 (PPT1C)での過剰間隙水圧比の方が小さくなっており、オンライン地震応答実験結果と同じ傾向を示していることが判る。

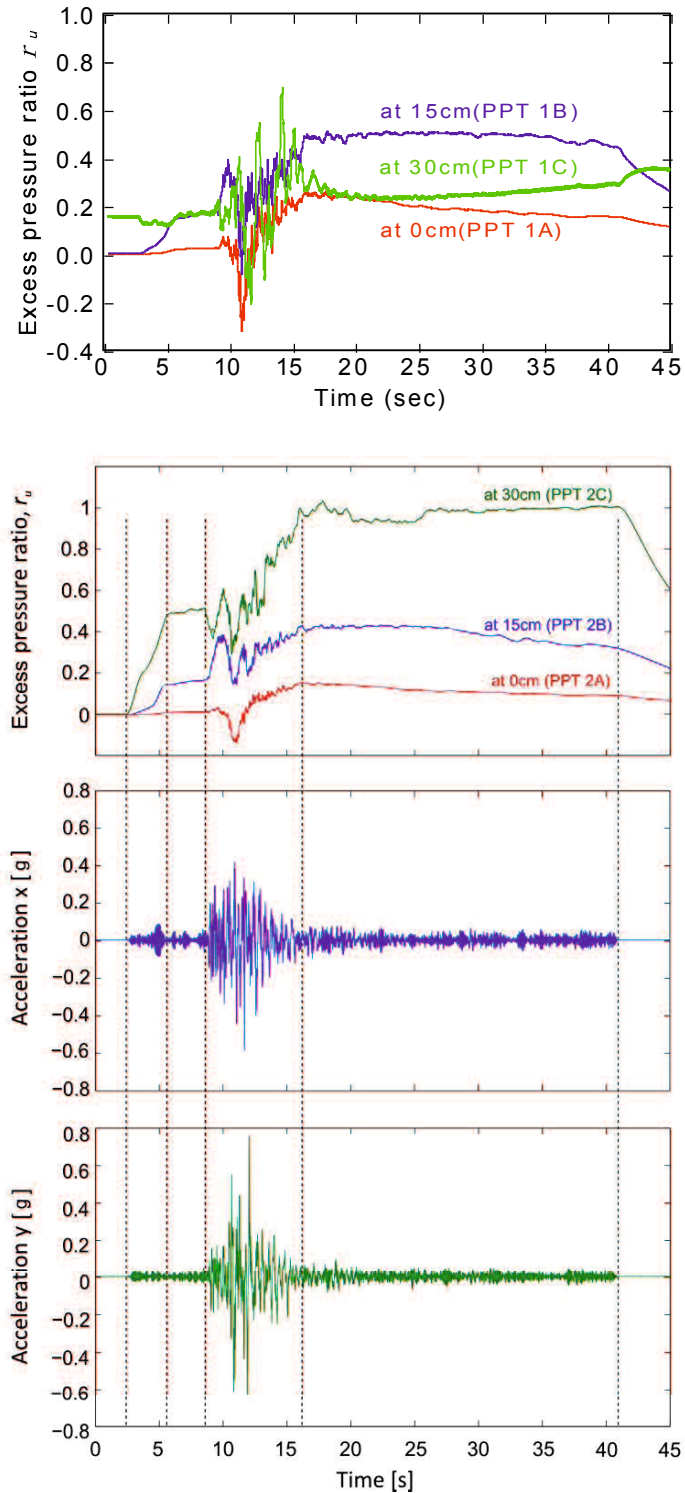


図 3.5.5 クライストチャーチ 40%地震波加振時の未改良地盤モデル内とタイヤチップ改良地盤モデル内の過剰間隙水圧比時刻歴

(3) クライストチャーチ 100%地震波で加振した場合の家屋モデルの状況

写真 3.5.5 と写真 3.5.6 はクライストチャーチ 100%地震波で基礎スラブ下地盤にタイヤチップ層を敷設した場合（改良地盤モデル）と、基礎スラブ下地盤にタイヤチップ層を設けていない場合（未改良地盤モデル）で同時に加振した際の加振前後の写真である。また、写真 3.5.7 はその際の改良地盤モデルのアップ写真、写真 3.5.8 は未改良地盤モデルのアップ写真を示す。

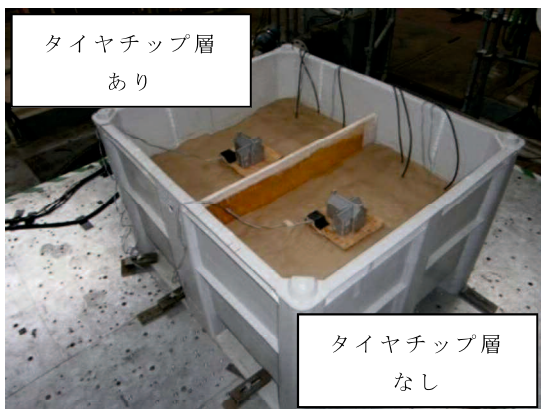


写真 3.5.5 加振前状況



写真 3.5.6 加振後状況



写真 3.5.7 改良地盤モデル（基礎下地盤下にタイヤチップ層あり）



写真 3.5.8 未改良地盤モデル（基礎下地盤下にタイヤチップ層なし）

以上の状況結果より，今回の実験では，タイヤチップ層を敷設した改良地盤モデルの場合，オンライン地震応答実験の結果と同じくタイヤチップ層はもとより，その上の未改良層の過剰間隙水圧の発生を抑え，結局この2層を非液状化層とした結果，液状化に伴う沈下・傾斜の影響は極めて小さかったことを目視範囲ではあるが確認した．

3.6 本章の要約

前章では、一連の単調および繰返し三軸試験や動的変形試験の結果から、タイヤチップは液状化を起こす材料ではなく、過剰間隙水圧の上昇を抑制する効果を持つことを確認した。また、中空ねじりせん断試験より得られた広範なひずみ域におけるタイヤチップの動的変形特性を確認した。これらの得られたタイヤチップの力学特性を勘案し、飽和砂地盤上の戸建住宅基礎地盤に適用し、地震時の液状化および応答の低減効果について、せん断による地盤材料の間隙水圧の上昇に伴う有効応力の変化および材料の非線形も考慮でき、液状化過程まで扱える手法であるオンライン地震応答解析にて検討した。オンライン地震応答解析は、1次元の評価ではあるが、主要なせん断波の伝搬特性については評価できた。次に筆者らのタイヤチップ地盤改良の概念にて、イギリス・ブリストル大学にてバタチャリア博士指導のもと、3次元1G場振動台模型実験を実施した結果、オンライン地震応答実験と同様に、基礎スラブ下地盤であるタイヤチップ改良層上層の未改良地盤における、剰間隙水圧比の上昇が抑制されたことを確認した。

本章で得られた知見は以下の通りである。

- (1) オンライン地震応答解析結果より、タイヤチップ単体を実験用想定地盤モデルS2層(GL-2~-4m)に施した場合、S2層はもとより、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⁷⁶⁾を人工的に地表面から4m構築することができたことを確認した。(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) オンライン地震応答解析結果より、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、戸建住宅の水平方向固有振動成分を含む0.1~5Hz間の周波数

成分が大幅に低減され結果的に、戸建住宅の時刻歴応答加速度は最大値が1/3以下になったことを確認した。

- (3) 1G 場振動台模型実験では、実際に模型住宅基礎下にタイヤチップ改良層を敷設したが、モデル地盤剛性の低下に伴う基礎スラブ上の応答振動数帯域の差異は、水平(XY)方向にはなかった。しかし鉛直 Z 方向に関しては、応答振動数帯域がやや下がっていることが見て取れた。
- (4) 1G 場振動台模型実験では、クライストチャーチ 40%地震波で 3 次元加振した際、タイヤチップ層下の未改良地盤位置における過剰間隙水圧比よりも、タイヤチップ層上の未改良地盤位置での過剰間隙水圧比の方が小さくなっており、オンライン地震応答実験結果と同じ傾向を示していることが判る。
- (5) 1G 場振動台模型実験では、クライストチャーチ 40%地震波で 3 次元加振した際、基礎スラブ下未改良地盤に於いては過剰間隙水圧比が、タイヤチップ改良層がない場合は、加振後 16 秒後に 1.0 に達し加振中ほぼ、維持し液状化が生じてことを確認できるが、タイヤチップ改良層がある場合は、最大値でも 0.4 未満であり液状化を確認できない。オンライン地震応答実験結果と同じ傾向を示していることが判る。
- (6) 1G 場振動台模型実験では、クライストチャーチ 100%地震波で 3 次元加振した際、タイヤチップ改良層がない場合は、模型住宅基礎スラブが液状化に伴う不同沈下で模型地盤面下に沈下傾斜しているが、タイヤチップ改良層がある場合は、基礎スラブが模型地盤面下に傾斜沈下していないことを確認した。

参考文献

- 1) N.C.Raab and H.C.Wood:Earthquake Stress in the San Francisco-Oakland Bay Bridge, Proc., ASCE, Jour.No.2123, 1941
- 2) M.A.Biot:Analytical and Experimental Methods in Engineering Seismology, Proc., ASCE, Jour.No.2183, 1943
- 3) 妹沢克惟, 金井清:地震波によって土地の固有振動が誘起される可能性, 震研彙報, 第10巻, 1932
- 4) G.W.Housner, R.R.Martel, J.L.Aiford: Spectrum Analysis Strong-Motion Earthquakes, Bull., Seismological Society of America, Vol.43, No.2, April, 1953
- 5) 大森房吉:鉄道橋の「曲り」および振動の験測, 震災予防調査会報告, 第37巻, 1901
- 6) 吉田望:地震応答解析の実際—非線形及び液状化解析の事例とその評価講習会資料, pp.1, 工業技術会
- 7) 伯野元彦・四俵正俊・原司:計算機により制御された, はりの動的破壊実験, 土木学会論文報告集, No.171, pp.1-9, 1969.
- 8) 家村宏和:ハイブリット実験の発展と将来, 土木学会論文集, No.356, I-3, pp.1-10, 1985.
- 9) 例えば, 高梨晃一・宇田川邦明ら:電算機-試験機オンラインシステムによる構造物の非線形地震応答解析(その1)システムの内容, 日本建築学会論文報告集, No.229, pp.73-83, 1975.
- 10) 例えば, 岡田恒雄・関松太郎:電算機-アクチュエーターオンラインシステムによる鉄筋コンクリート骨組の地震応答実験(その1)目的および方法論, 日本建築学会論文報告集, No.275, pp.77-84, 1979.
- 11) 例えば, 岡本伸:仮動的実物大耐震実験システムの開発, 建設省建築研究所秋季講演会概要集, pp.259-286, 1979.
- 12) 例えば, 山田善一・家村浩和・西村一郎:履歴吸収エネルギーによるRC橋脚模型の耐震性評価, 第17回地震工学研究発表会講演概要, pp.231-234, 1984.

- 13) 例えば, 伯野元彦・横山功一・佐藤安一郎: 模型杭基礎の復元力特性に関するオンライン・リアルタイム実験, 土木学会論文報告集, No.200, pp.85-90, 1972.
- 14) 望月利男: くい上部構造物連成系の振動特性に関するオンラインリアルタイム実験(その1), 日本建築学会論文報告集, No.318, pp.63-71, 1975
- 15) 片田敏行・伯野元彦: オンライン実験による液状化地盤の非線形振動解析, 土木学会論文報告集, No.318, pp.21-28, 1982.
- 16) オンライン応答実験委員会: オンライン応答実験システムの開発と構造実験への適用, オンライン応答実験研究委員会昭和60年度成果報告集, pp.1~165, 1986.
- 17) オンライン応答実験委員会: オンライン応答実験の現状と将来展望, オンライン応答実験研究委員会昭和61年度成果報告集, pp.1~202, 1987.
- 18) 中島正愛・石田雅利・安藤和博: サブストラクチャ仮動的実験のための数値積分法 サブストラクチャ法を用いた仮動的実験の開発, 日本建築学会構造系論文報告集, No.417, pp107-117, 1990.
- 19) 中井博・北田俊行・中西克佳: ハイブリッド実験システムを用いた鋼製・合成柱の耐荷性および耐震性に関する研究, 大阪市立大学工学部紀要・震災特大号, pp.131-148, 1997.
- 20) 榎並昭・安達俊夫・三輪紅介・小池潤・清水弘: 擬似動的実験による砂の動的性質, 第28回土質工学研究発表会, pp.903-906, 1993.
- 21) 日下部伸・有本勝二・森尾敏・マハムードモメンザーデ: 地盤系オンライン地震応答実験システムの開発, 第22回土質工学研究発表会, pp.523-526, 1987.
- 22) 日下部伸・森尾敏・有本勝二: 地盤系オンライン地震応答実験システムの開発(その2), 第23回土質工学研究発表会, pp.741-744, 1988.
- 23) 日下部伸・森尾敏・有本勝二: 地盤系オンライン地震応答実験システムの開発(その3), 第24回土質工学研究発表会, pp.771-774, 1989.
- 24) 日下部伸・森尾敏・有本勝二: オンライン地震応答実験による2層系砂地盤の液状化挙動, 土質工学会論文報告集, Vol.30, No.3, pp.174-184, 1990.

- 25) 日下部伸・森尾敏・有本勝二：地盤系オンライン地震応答実験システムの開発（その4），第25回土質工学研究発表会，pp.725-728，1990.
- 26) 日下部伸・森尾敏・有本勝二：地盤系オンライン地震応答実験システムの開発（その5），第26回土質工学研究発表会，pp.781-782，1991.
- 27) 前川昌教・山田恭央・五十嵐正剛：排水量を制御した砂の液状化試験，第26回土質工学研究発表会，pp.737-738，1991.
- 28) 山田雅一・安達俊夫・清水弘・榎並昭：中空ねじりせん断試験装置を用いた地盤系仮動的実験システムの開発，平成6年度日本大学理工学部学術講演会論文集，C-31，pp.87-88.1994.
- 29) 日下部伸・森尾敏・岡林巧・藤井照久・兵動正幸：簡易直接せん断試験装置の試作と種々の液状化試験への適応，土木学会論文集 No.617，Ⅲ-46，299-304，1999.
- 30) 日下部伸・森尾敏：粒子表面形状が異なる砂の地震応答液状化抵抗，土木学会論文集，No.517，Ⅲ-31，pp.149-158，1995.
- 31) 例えば，日下部伸・森尾敏：シリカ薄液による改良砂の液状化抵抗の評価，第34回地盤工学研究発表会，pp.1009-1010，1999.
- 32) 原本利徳・兵動正幸・中田幸男・日下部伸：粘土地盤上の盛土の動的遠心模型実験（その14）-オンライン地震応答実験による盛土周辺地盤の変形の評価-，第33回地盤工学研究発表会，pp.1029-1030，1998.
- 33) *T.Fujii, M.Hyodo, Y.Nakata, K.Yabuki&S.Kusakabe: "On-line earthquake response tests on embankments founded on saturated sandy deposits.,Proceeding Of The Internatinal Symposium On Stability Engineering - IS-SHIKOKU'99, pp.606-612, 1999.*
- 34) 藤井照久・兵動正幸・日下部伸・福田賢二郎：オンライン地震応答実験による飽和砂地盤上の盛土の挙動，土木学会論文集 No.652 Ⅲ-51，229-243，2000.
- 35) 藤井照久：飽和砂および粘性土地盤上の土構造物の地震時安定度評価に関する研究，山口大学博士論文，2000.
- 36) 福田賢二郎：オンライン地震応答実験による高盛土の耐震性の評価，山口大学修士論文，2001.

- 37) 藤井照久・福田賢二郎・大中英輝・兵動正幸：変形を考慮した盛土の耐震評価法，土と基礎，Vol.50，No.1，Ser.No.528，pp10-12，2002.
- 38) 河本好広・兵動正幸：吉本憲正：オンライン地震応答実験による高盛土の応答特性，第57回土木学会年次学術講演会，pp.1091-1092，2002.
- 39) *M.Hyodo, S.Yamamoto, K.Fukuda., K.Kamesaki, Y.Yamaguchi : Behavior of Sand Seabed Underneath a Gravity Offshore Structure Subjected to Ice and Seismic Force., The Proceeding of The Tenth (2000) International Offshore And Polar Engineering Conference, Volume I ,pp.555-561, 2000.*
- 40) 山根祐輔・兵動正幸・吉本憲正：氷海域における重力式海洋構造物基礎地盤の地震時挙動(その1 水中振動大実験との比較)，第37回地盤工学会研究発表会発表講演集，pp.1837-1838，2002.
- 41) 河本好広・兵動正幸・吉本憲正：氷海域における重力式海洋構造物基礎地盤の地震時挙動(その2 不規則波入力と規則波入力における検討)，第37回地盤工学会研究発表会発表講演集，pp.1839-1840，2002.
- 42) 木村真也・兵動正幸・吉本憲正，河本好広：オンライン地震応答実験による重力式海洋構造物基礎地盤の挙動，第38回地盤工学会研究発表会発表講演集，pp.1967-1968，2003.
- 43) 河本好広・兵動正幸・吉本憲正・山本陽一・高橋直樹・木村真也：粘土層を含む飽和砂地盤の地震応答特性，第38回地盤工学会研究発表会発表講演集，pp.1971-1972，2003.
- 44) 三浦房紀・兵動正幸・吉本憲正・岸下崇裕・山本陽一・高橋直樹：液状化地盤における多層固化改良に関する研究（その1：振動台実験と考察），第38回地盤工学研究発表会発表講演集，pp. 1873-1874, 2003.
- 45) 兵動正幸・三浦房紀・吉本憲正・山本陽一・高橋直樹・岸下崇裕：液状化地盤における多層固化改良に関する研究（その2：改良率と改良効果について），第38回地盤工学研究発表会発表講演集，pp. 1875-1876,2003.
- 46) 兵動正幸・三浦房紀・吉本憲正・高橋直樹・山本陽一・岸下崇裕・木村真也：液状化地盤における多層固化改良に関する研究（その3：オンライン地震応答実験による検証），第38回地盤工学研究発表会発表講演集，pp. 1877-1878, 2003.

- 47) 三浦房紀・兵動正幸・吉本憲正・岸下崇裕・山本陽一・高橋直樹：液状化地盤における多層固化改良に関する振動台実験(改良率と改良幅の影響について)，土木学会第58回年次学術講演会講演集
- 48) 兵動正幸・三浦房紀・吉本憲正・高橋直樹・山本陽一・岸下崇裕・木村真也：液状化地盤における多層固化改良に関するオンライン地震応答実験(改良形式の比較)，土木学会第58回年次学術講演会講演集
- 49) 三浦房紀・兵動正幸・吉本憲正・岸下崇裕・山本陽一・高橋直樹：液状化地盤における多層固化改良に関する研究(その4：改良形式の比較)，第39回地盤工学研究発表会発表講演会集，pp.1819-1820,2004
- 50) 市川昌治・兵動正幸・吉本憲正・山本陽一・高橋直樹・岸下崇裕・木村真也：オンライン地震応答実験による多層固化改良に関する研究，第39回地盤工学研究発表会発表講演会集，pp. 1821-1822,2004
- 51) 岡二三生：地盤液状化の科学，pp.153-154，近未来社，2001.
- 52) 岸下崇裕・山本陽一・高橋直樹・兵動正幸・三浦房紀：液状化地盤中の杭挙動について(その1：模型振動台実験と考察)，地盤工学研究発表会概要集，pp.1855-1856，2002.7
- 53) 山本陽一・岸下崇裕・高橋直樹・兵動正幸・三浦房紀：液状化地盤中の杭挙動について(その2：有効応力解析によるシミュレーション)，地盤工学研究発表会概要集，pp.1857-1858，2002.7
- 54) 高橋直樹・岸下崇裕・山本陽一・兵動正幸・三浦房紀：模型振動台実験による液状化地盤中の杭挙動について，第11回日本地震工学シンポジウム，2002.11
- 55) 木村真也，兵動正幸，吉本憲正，岸下崇裕，山本陽一，高橋直樹，市川昌治：杭・構造物-地盤連成系オンライン地震応答実験による液状化地盤中の杭挙動について，第39回地盤工学研究発表会発表講演会集，pp.1587-1588,2004
- 56) 山口晶：1995年兵庫県南部地震における神戸沖合い人工島の地震時挙動，東北大学博士論文，2001.
- 57) 山口晶・風間基樹・日下部伸：神戸沖合人工島地盤のオンライン地震応答実験，土木学会論文集，No.701，III-58，pp.181-195，2002.

- 58) 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実験, 材料, Vol.59, pp.20-25, 2010.
- 59) T.Kaneko, R.P.Orense, M.Hyodo, N.Yoshimoto: Seismic Response Characteristics of Saturated Sand Deposits Mixed with Tire Chips, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, pp.633-643, 2013.
- 60) 金子崇, 兵動正幸, 河田慎治郎, 吉本憲正, ハザリカヘマンタ: オンライン地震応答実験によるタイヤチップの免震効果の評価, 第43回地盤工学研究発表会発表講演集, PP.537-538, 2008.
- 61) 金子崇, 兵動正幸, 中田幸男, 吉本憲正, HazarikaHemanta: 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性, 土木学会論文報告集 C, Vol.69, No1, pp.91-107, 2013.
- 62) 例えば, 日下部伸・有本勝二・森尾敏・モハムード・モメンザーデ: 地盤系オンライン地震応答実験システムの開発, 第22回土質工学研究発表会, pp.523-526, 1987.
- 63) 柴田明德: 最新建築学シリーズ9 最新耐震構造解析, pp.97-108, 森北出版株式会社, 1981.
- 64) 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.
- 65) (社)地盤工学会: 地盤工学ハンドブック, pp.221-223, 1999.
- 66) 柴田明德: 最新建築学シリーズ9 最新耐震構造解析, pp.69-71, 森北出版株式会社, 1981.
- 67) 日下部伸・森尾敏・有本勝二: 地盤系オンライン地震応答実験システムの開発(その3), 第24回土質工学研究発表会, pp.771-774, 1989.
- 68) 日下部伸: オンライン地震応答実験による地盤の動的挙動に関する研究, 山口大学博士論文, 1995.898989
- 69) 建設省土木研究所 地震防災部振動研究室: 地盤の地震応答特性の数値解析法 -SHAKE: DESRA-, pp.15-18, 1982.
- 70) 北沢, 竹山, 鈴木, 大河原, 大崎: 東京地盤図, 技報堂, 1959.

- 71) Imai,T.and Tonouchi,K. : Correlation of N value with S wave velocity and shear Modulus, Proc., 2nd ESOPT, pp.57-72, 1982
- 72) 千葉県：地質環境インフォメーション,
<http://www.pref.chiba.lg.jp/pbgeogis/servelt/infobank.index>
- 73) 日本建築学会：建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計,
pp.52-57, 2009.
- 74) 独立行政法人防災科学技術研究所：強震観測網 K-NET,
http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/docs/kyoshin_index.html
- 75) Georgios Nikitas, Subhamoy Bhattacharya, Masayuki Hyodo, Atsuhiko Konja, Stergios Mitoulis : Use of rubber for improving the performance of domestic buildings against seismic liquefaction, *proceedings of the 9th International Conference on Structural Dynamics EURODYN 2014*, pp.259-265, 2014.
- 76) 日本建築学会：小規模建築物基礎設計指針, pp.89-92, 2008.

第4章 結論

4.1 研究成果

2011年東北地方太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、確固たる経済的な有効な対策技術・工法が無いのが実情である。本研究では、先ず、リサイクル材であるタイヤチップの力学特性を明確にして、この力学特性を勘案したうえで、タイヤチップを地盤改良材として戸建住宅基礎地盤に適用することにより、地震時での液状化防止と応答の低減を図ることを目的にしている。そのため、タイヤチップの圧縮、せん断特性を調べた。三軸試験機を用いて等方圧縮載荷・除荷試験、排水・非排水せん断載荷および除荷試験、平均主応力一定せん断載荷・除荷試験をそれぞれ実施し、さらに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のメカニズムを調べ、それぞれの試験結果の対応で考察を行った。また、中空ねじりせん断試験より得られた広範なひずみ域におけるタイヤチップの動的変形特性を調べた。これら得られた力学特性を勘案し、オンライン地震応答解析ならびにイギリス・ブリストル大学のバタチャリア博士のご協力のもと、3次元1G場振動台模型実験を実施し、タイヤチップを住宅基礎地盤に敷設することによる液状化防止ならびに応答の低減効果について評価・考察した。

以下に各章で得られた知見をまとめ示す。

第1章では、タイヤチップのリサイクル状況や新しい地盤材料としてタイヤチップを用いた既往の研究について述べ、タイヤチップを地盤材料として用いることの有用性とタイヤチップの力学特性を明確にした研究がまだない旨を説明した。また、東日本大震災以降、甚大な被害があった戸建住宅の液状化問題がクローズアップされ、その結果、産官学をあげて様々な研究開発がされている中での、戸建住宅を対象とした液状化対策の現状を説明・紹介し、本研究の背景とタイヤチップ地盤改良の概念を提示し目的を述べた。

第2章では、タイヤチップの最大の特徴である液状化抑制材料としての有効性を生かし実用化するために先ず、タイヤチップの圧縮、せん断特性を調べた。三軸試験機を用いて等方圧縮載荷・除荷試験、排水・非排水せん断載荷および除荷試験、平均主応力一定せん断載荷・除荷試験をそれぞれ実施し、さらに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のメカニズムを調べ、それぞれの試験結果の対応で考察を行った。また、中空ねじりせん断試より得られた広範なひずみ域におけるタイヤチップの動的変形特性を調べた。その結果、以下のような知見が得られた。

- (1) 排水・非排水条件下での単調せん断載荷・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、軸ひずみ $\varepsilon_a=20\%$ まで載荷しても終始弾性的挙動を示し、破壊に至る兆候はみられない。
- (2) 排水・非排水条件下での平均主応力一定および側圧一定試験結果より、載荷時に発生した体積ひずみと間隙水圧は除荷時には、体積ひずみはわずかに残留ひずみがあるもののほとんど0に戻り、間隙水圧はほとんど消失していることより、タイヤチップのせん断載荷による体積変化は、そのほとんどが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。
- (3) 排水条件下での側圧一定と平均主応力一定のせん断載荷試験による体積ひずみと等方圧縮除荷試験による体積ひずみの比較から、タイヤチップの体積変化には、せん断載荷除荷のみの場合はほとんど元の0に戻るが、等方応力成分も付加された載荷や等方圧縮除荷という等方応力成分のみの載荷の場合には、数%ではあるが、残留体積ひずみが生じるという載荷の違いによる特性があることを確認した。
- (4) (2), (3)の知見は、粒径 0.5mm 以下で粒度分布のあるタイヤチップ試料に関しての事項である。これに対して、粒径 2.0mm 以下のほぼ単一粒

径のタイヤチップ試料にて、側圧一定排水単調せん断試験にて載荷・除荷を粒径 0.5mm のもと同様に実施した結果、軸差応力-軸ひずみ関係はほぼ 0 に戻ることを確認した。

- (5) (2), (3), (4)の知見より、タイヤチップ粒状体の圧縮・せん断変形のメカニズムを考察した。タイヤチップ供試体にせん断力のみ載荷した場合は、タイヤチップ粒子接触面にて可逆的な弾性変形のみが生じ、等方圧縮載荷をした場合は、タイヤチップの粒子が、行き場無く間隙部に、すべりや転位により粒子移動し、結果的に塑性的な変形（残留ひずみ）が生じたものと推測する。
- (6) 非排水繰返し三軸試験結果より、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く。また有効応力経路より、有効応力の低下は 1 割程度であり、過剰間隙水圧も累積増加することなく、タイヤチップは液状化が生じる材料ではないことを確認した。
- (7) 一連の単調および繰返し三軸試験結果および、ひずみ速度(載荷速度)を変えた排水単調せん断試験結果より、ひずみ速度が大きい程、剛性が上がり、過剰間隙水圧が発生しづらくなるというひずみ速度効果がタイヤチップで確認でき、地震時のようにせん断ひずみ速度が大きい場合に、間隙水圧の発生量を抑えることは明らかである。
- (8) 中空ねじりせん断試験結果より、タイヤチップはせん断ひずみが増加しても過剰間隙水圧比はほとんど増加せず、過剰間隙水圧比は $\Delta u/\sigma'_c=0.2$ にも至らない。また、タイヤチップの初期せん断弾性係数は有効拘束圧の影響を受けているが非常に小さく、およそ砂の 1/100 程度の値であり、液状化を起こした場合のそれと同等であるといえる。

- (9) タイヤチップの動的変形特性 ($G_{eq}/G_0 \sim \gamma$ 関係および $h \sim \gamma$ 関係) は、本研究で適用した拘束圧の範囲 ($\sigma_c' = 50, 100 \text{kPa}$) では、有効拘束圧の影響を受けない。
- (10) 過剰間隙水圧比と片振幅せん断ひずみの関係より、過剰間隙水圧が珪砂の場合で、せん断ひずみ振幅が 0.01% を超えたところで、タイヤチップの場合、約 10 倍高い 0.1% を超えたところでそれぞれ発生し始めており、タイヤチップの動的変形特性 ($G_{eq}/G_0 \sim \gamma$ 関係および $h \sim \gamma$ 関係) と対応している。
- (11) 本研究での提案地盤改良は、通常の地盤剛性を上げるものと異なり、逆にタイヤチップの改良層において地盤剛性が下がることになるため、そもそも、タイヤチップ改良層があるがゆえに、住宅の不均一荷重（一部平屋建て或いは2階建ての3階建て）がかかった際に、沈下傾斜しないかを、有限要素法による2次元平面ひずみ弾性解析を実施し、検証した結果、品確法のレベル1（3/1000）にも満たないことを確認した。

第3章では、第2章で確認・評価したタイヤチップの力学特性を勘案し、飽和砂地盤上の戸建住宅基礎地盤にタイヤチップ適用した地盤改良を想定し、地震時の液状化および応答の低減効果について、せん断による地盤材料の間隙水圧の上昇に伴う有効応力の変化および材料の非線形も考慮でき、液状化過程まで扱える手法であるオンライン地震応答解析にて検討し、1次元の評価ではあるが、主要なせん断波の伝搬特性については評価できた。次に筆者らのタイヤチップ地盤改良の概念にて、イギリス・ブリストル大学にてバタチャリア博士指導のもと、3次元1G場振動台模型実験を実施した結果、オンライン地震応答実験と同様に、基礎スラブ下地盤であるタイヤチップ改良層上層の未改良地盤における、過剰間隙水圧比の上昇が抑制されたことを確認した。その結果、以下のような知見が得られた。

- (1) オンライン地震応答解析結果より、タイヤチップ単体を実験用想定地盤モデルS2層 (GL-2 ~ -4m) に施した場合、S2層はもとより、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¹⁾を人工的に地表面から4m構築することができたことを確認した。(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) オンライン地震応答解析結果より、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、戸建住宅の水平方向固有振動成分を含む0.1～5Hz間の周波数成分が大幅に低減され結果的に、戸建住宅の時刻歴応答加速度は最大値が1/3以下になったことを確認した。
- (3) 1G 場振動台模型実験では、実際に模型住宅基礎下にタイヤチップ改良層を敷設したが、モデル地盤剛性の低下に伴う基礎スラブ上の応答振動数帯域の差異は、水平(XY)方向にはなかった。しかし鉛直 Z 方向に関しては、応答振動数帯域がやや下がっていることが見て取れた。
- (4) 1G 場振動台模型実験では、クライストチャーチ 40%地震波で 3 次元加振した際、タイヤチップ層下の未改良地盤位置における過剰間隙水圧比よりも、タイヤチップ層上の未改良地盤位置での過剰間隙水圧比の方が小さくなっており、オンライン地震応答実験結果と同じ傾向を示していることが判る。
- (5) 1G 場振動台模型実験では、クライストチャーチ 40%地震波で 3 次元加振した際、基礎スラブ下未改良地盤に於いては過剰間隙水圧比が、タイヤチップ改良層がない場合は、加振後 16 秒後に 1.0 に達し加振中ほぼ、維持し液状化が生じていることを確認できるが、タイヤチップ改良層がある場合は、最大値でも 0.4 未満であり液状化を確認できない。オンライン地震応答実験結果と同じ傾向を示していることが判る。

- (6) 1G 場振動台模型実験では、クライストチャーチ 100%地震波で 3 次元加振した際、タイヤチップ改良層がない場合は、模型住宅基礎スラブが液状化に伴う不同沈下で模型地盤面下に沈下傾斜しているが、タイヤチップ改良層がある場合は、基礎スラブが模型地盤面下に傾斜沈下していない違いを確認した。

4.2 今後の課題

本研究における動的試験としては、オンライン地震応答解析と1G場振動台模型実験を実施した。前者は、要素を増やすと多額な費用を要することから、1次元による評価としたが、主要なせん断波の伝搬特性は評価出来たと考えられる。この次元数を補った1G場振動台模型実験は、有意義な実験であったが、今回の実験では両実験の条件の違い(拘束圧, ひずみ速度依存性, 模型地盤の変形拘束性, ビニール袋詰めなど)により、特に応答加速度低減効果について、その検証結果の違いを確認した。実用化のための検証を今後実施する際には、こういった条件をそろえ、今回の研究より判った未確認事項を改めて確認する必要があるものとする。

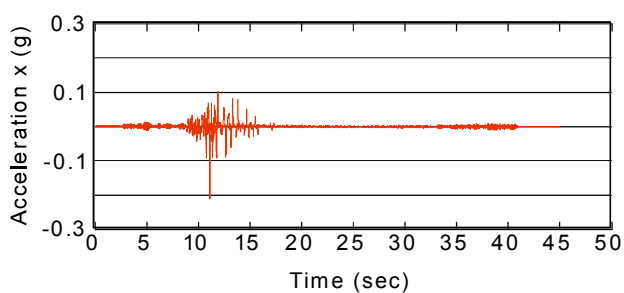
その他、オンライン地震応答解析では、解析対象地盤を一次元の質点系に置換したため、実地盤における周辺地盤の影響を考慮していない問題が残る。現状のオンライン実験では、要素を増やすためには多額の費用を要することから、1次元による評価としたが、主要なせん断波の伝播特性については評価出来たと考えられる。今後、2次元および3次元的な評価に拡張していくことも望まれる。また、1G場振動台模型実験では壁面の影響を考慮すべきであったと考える。模型実験では、半無限地盤中の実物を想定することが多いため土槽寸法の制約の中で壁の影響を受けないように模型を作る必要があると考える。振動と直角方向の壁の影響で最も問題になるのが、壁により変形が拘束されることであるとする。

参考文献

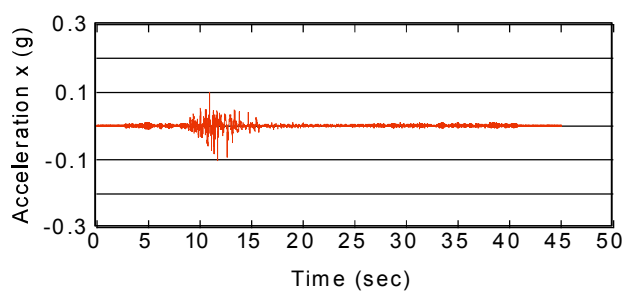
- 1) 日本建築学会：小規模建築物基礎設計指針，pp.89-92，2008.

付録 振動台模型実験における各測点加速度時刻歴データ

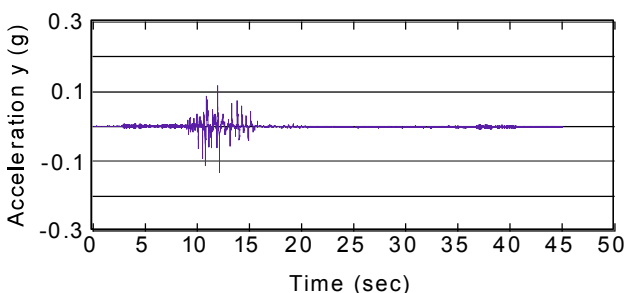
クライストチャーチ40%地震波で加振した場合の各測点(Acc1, Acc2, Acc3, Acc4, Acc5, Acc6)のX Y Z方向毎の加速度時刻歴データを付図1～付図18に示す。なお、データの一部の乱れは加振時に加速度計が移動したことによるものである。また、各測点位置は第3章 P114 図 3.5.3 を参照。



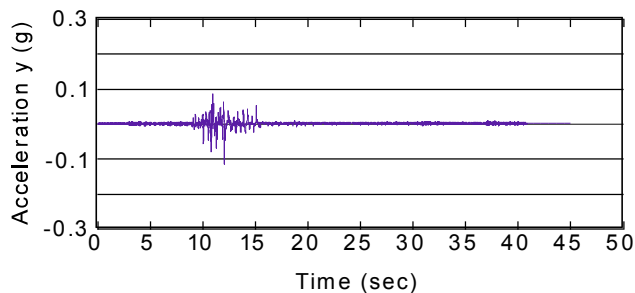
X 方向



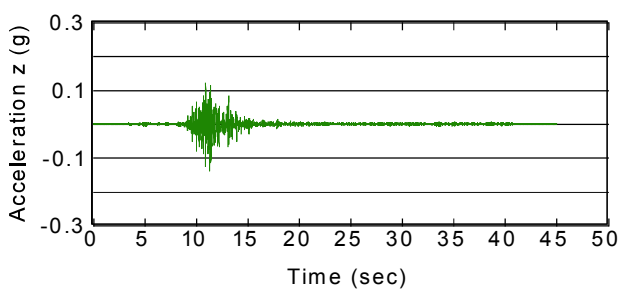
X 方向



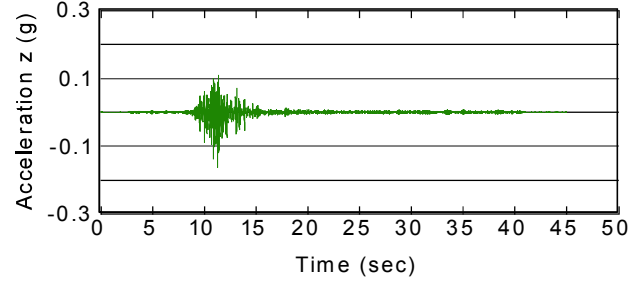
Y 方向



Y 方向



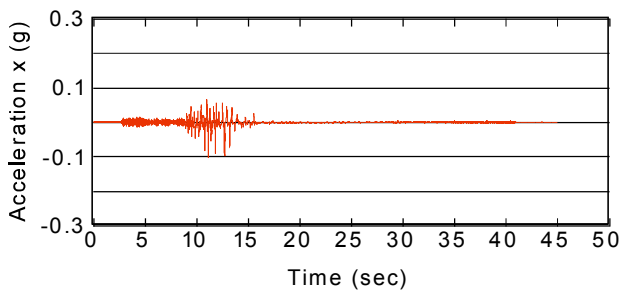
Z 方向



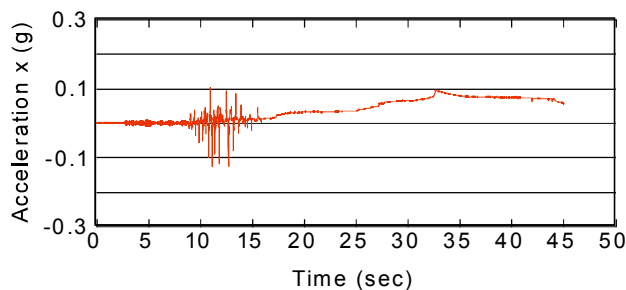
Z 方向

付図1 測点 Acc1 加速度

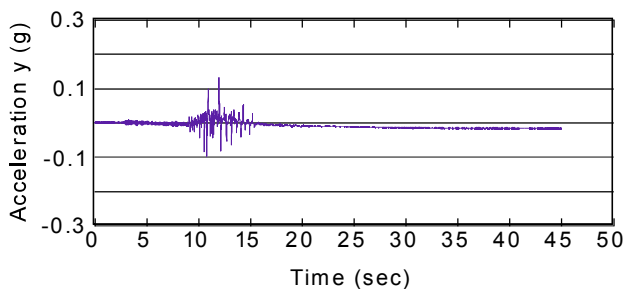
付図2 測点 Acc2 加速度



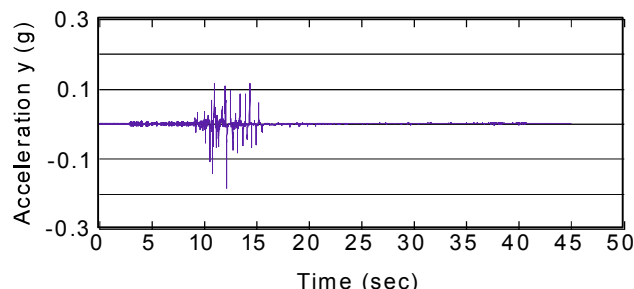
X 方向



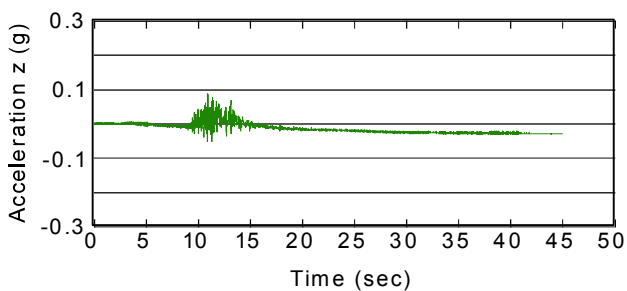
X 方向



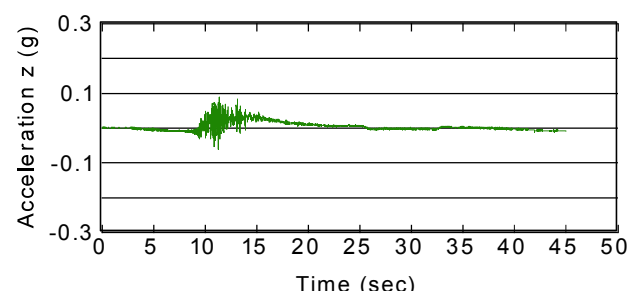
Y 方向



Y 方向



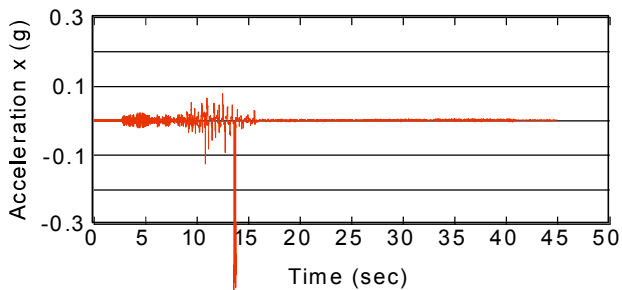
Z 方向



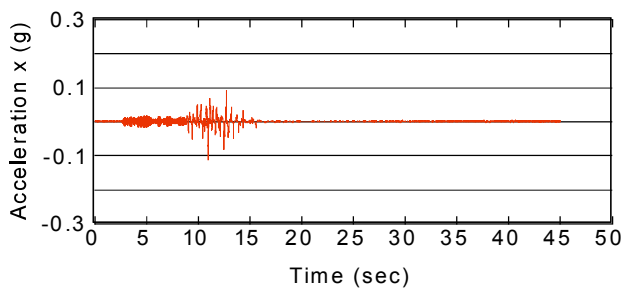
Z 方向

付図 3 測点 Acc3 加速度

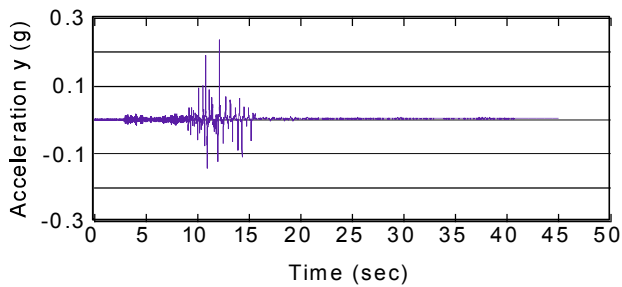
付図 4 測点 Acc4 加速度



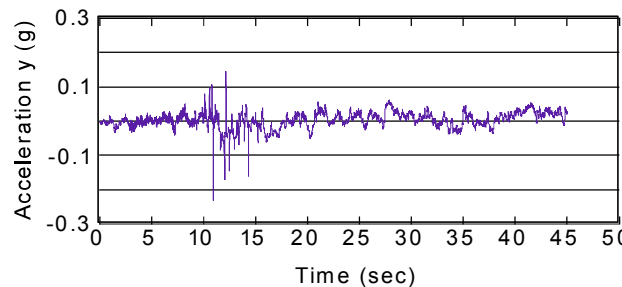
X 方向



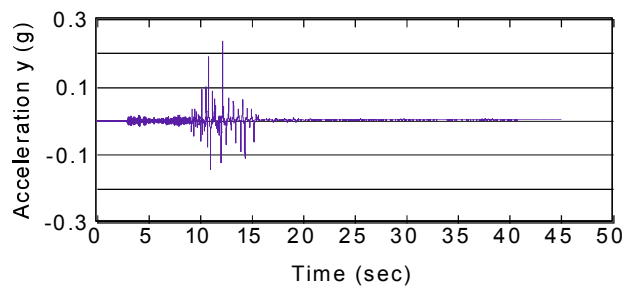
X 方向



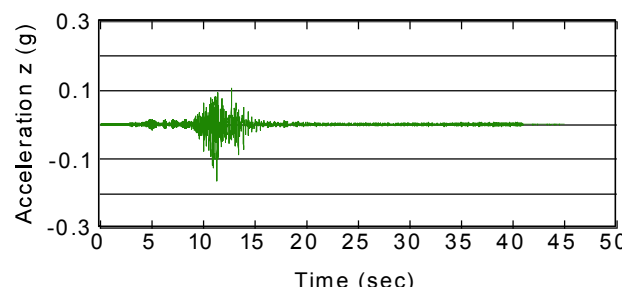
Y 方向



Y 方向



Z 方向



Z 方向

付図 5 測点 Acc5 加速度

付図 6 測点 Acc6 加速度