

## 軽量地盤材料の物性評価と適用

### 3. 軽量地盤材料の物性とその評価方法（その2）

規 矩 大 義 (きく ひろよし)

佐藤工業(株)中央技術研究所

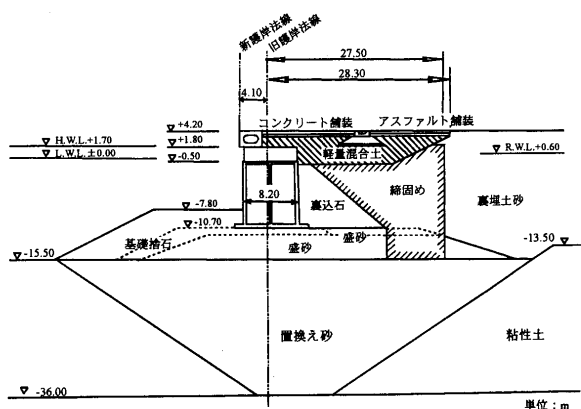
安 原 一 哉 (やすはら かずや)

茨城大学工学部都市システム工学科

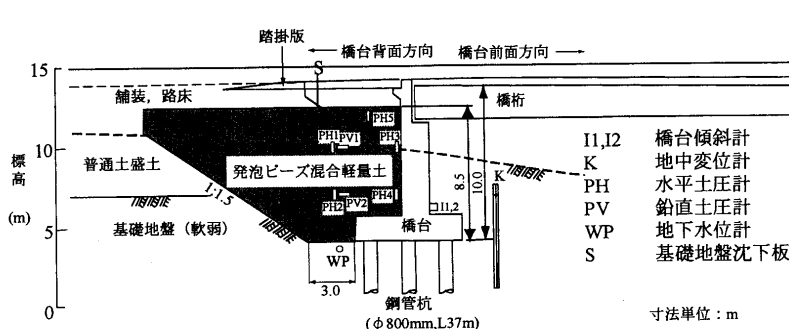
#### 3.2.2 動的物性(1)

阪神淡路大震災では数多くのケーソン岸壁で甚大な被害が生じたことは記憶に新しい。被災したケーソン岸壁の復旧に際して、ケーソンの変形量が比較的小さく、被災後も法線が直線を保っている岸壁などでは、一般に背後地盤から作用する地震時土圧を低減する方向で復旧が検討された。そのなかで、ケーソン背面地盤の土圧低減と液状化防止を目的に各種のセメント系固化工法も対象とされた。軽量混合土工法のなかからも、気泡混合処理土や発泡ビーズ混合軽量土が採用され、図—3.12に復旧断面の例を示したような復旧工事<sup>34)</sup>が施されている。

図—3.13は、青森県八戸市郊外で橋梁アバットの裏込め材として施工された発泡ビーズ混合土の施工断面<sup>35)</sup>である。この現場は軟弱地盤上の盛土の軽量化を目的に施工されたもので、耐震対策として軽量土が採用されたものではないが、施工中、完工後も、土圧や橋台の傾斜角、沈下量などの動態観測を行っており、その期間中に



図—3.12 軽量混合土を用いたケーソン護岸の復旧断面<sup>34)</sup>



図—3.13 橋梁アバット裏込めへの適用事例と橋台の傾斜・沈下の経時変化<sup>35)</sup>

2度の被害地震（北海道東方沖地震・震度4、三陸はるか沖地震・震度6）を経験した珍しい記録が得られた。2度の被害地震を経験しても、アバット底板の直上部にクラックが生じた程度で、軽量地盤材料が耐震性に優れていることが実証された事例である。

軽量地盤材料は、軽量化の本来の目的である、基礎地盤の沈下抑制や（常時の）土圧低減といった目的に加えて、抗土圧構造物の耐震補強など、動的な問題にかかわる用途にも利用されはじめている。こうした適用用途に対して、計画、設計、施工等を行っていくうえでは、この材料の動的強度や動的変形特性などの動的物性が明らかにされて行かなくてはならない。本報では、これまでに各機関で実施されてきた軽量地盤材料の動的物性についての研究例を紹介する。

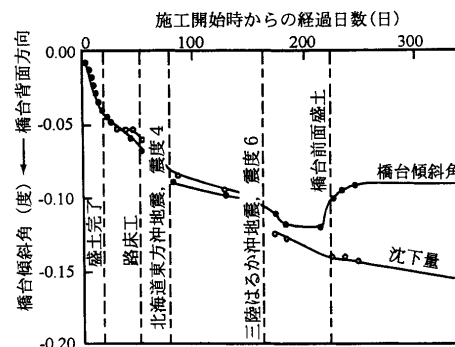
#### (1) 各機関の動的問題に対する取扱い

まずはじめに、軽量地盤材料の開発を主導的に進めてきた代表的機関において、各々の機関から発行されている基準書や設計指針類において、軽量地盤材料の動的問題（主に地震時）がどのような取扱いをされているかについて紹介する。

##### i) 発泡ビーズ混合軽量土

発泡ビーズ混合軽量土は、その密度自体が小さいために、一般の土質材料に比べて、地震により生じる慣性力は小さい。したがって、一般的な地震による被害は受けにくいと考えられている。また、材料の分離防止の目的で添加される固化材の働きで、粘性土に近い挙動を示すと考えられている。したがって、静的強度と同様、動的強度も大きいと考えられるので、飽和地盤の液状化の発生等の懸念も少ないと考えられている。

国土交通省（旧建設省）が中心となって開発を進めている発泡ビーズ混合軽量土<sup>36)</sup>では、耐震対策を主目的とした用途に用いられることが少ないため、材料そのもの



## 講 座

の動的特性に関しては、一般的な特徴について述べられるに留まっており、通常の設計レベルにおいては材料の動的物性が検討対象とはなっていない。ただし、軽量土を含んだ構造物全体の耐震性を評価する場合には、必要に応じて「道路土工指針」や「道路橋示方書・同解説」等に基づいた設計を行うように推奨している。

一方、国土交通省（旧運輸省）が中心となって開発を進めてきた発泡ビーズ混合処理土<sup>37)</sup>では、先に紹介した事例にもあるように、既設岸壁、護岸の耐震補強などに適用されることから、処理後の地盤に対する繰返し非排水三軸試験や動的変形係数を求める繰返し三軸試験も必要に応じて実施するよう指示されており、動的解析に用いる物性値についても言及されている。ただし、液状化に関しては、軽量化処理を施した地盤には十分な粘着力が付与されているものとして、その検討の必要はないものとされている。構造物全体系の地震時挙動に関する事項のうち、以降の回で詳述する地震時土圧の算定や斜面安定問題については、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」に従った方法が採られている。

## ii) 気泡混合軽量土

気泡混合軽量土についても、発泡ビーズ混合軽量土と同様に、一般的な地震被害は受けにくい材料と捉えられている。

国土交通省（旧建設省）<sup>36)</sup>では、気泡混合土の地震時挙動については、室内試験や実規模モデルの挙動観測がようやく緒についた段階であるということもあって、当面は地震荷重の検討を行う必要のない、国土交通省標準設計記載の重力式擁壁高さ（8 m）以下での使用に限定している。したがって、通常の適用条件の範囲内においては、設計段階で地震時土圧や慣性力を考慮してはいない。しかし、気泡混合土の施工部の形状によって、地震荷重を考慮する必要がある場合には、「道路土工指針」等に準拠して検討を行い、必要に応じて、すべり抵抗杭などの対策を講じるよう明記されている。なお、国土交通省（旧運輸省）<sup>37)</sup>の気泡混合処理土では、発泡ビーズ混合処理土と同様の取扱いがなされている。

日本道路公団<sup>38)</sup>で開発された気泡混合土工法（FCB工法）では、気泡混合土単体の動的物性の評価・検討方法については触れていないが、軽量土地盤が従来の構造物とは異なる地震応答特性を示す可能性があることの懸

念について明記している。したがって地震時の安定性検討については、地震荷重と慣性力を考慮するものとされており、その際に用いる設計水平震度は「道路土工一擁壁・カルバート・仮設構造物指針」に準じて求めさせている。また、地盤を含む全体系での安定問題に関しては、地震時の滑動・転倒について検討するよう要求している。

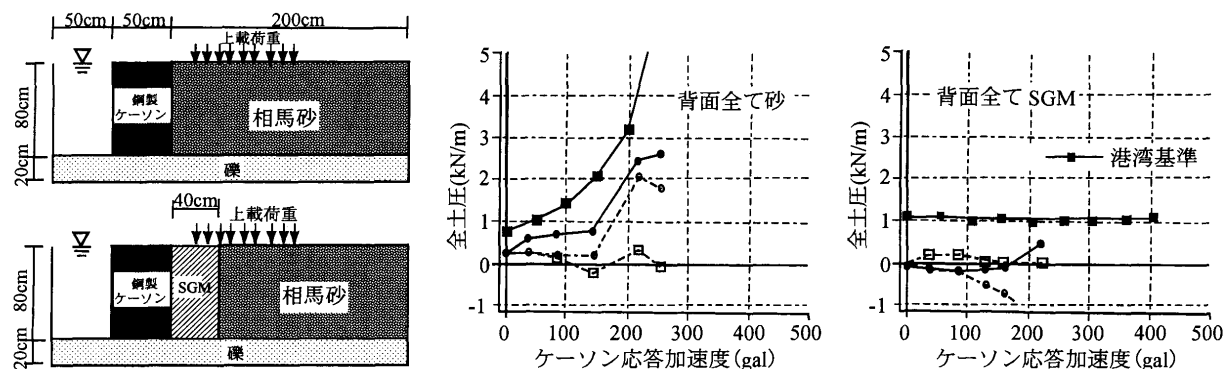
## (2) 軽量土の動的挙動に関する実験

## i) 地震時土圧特性

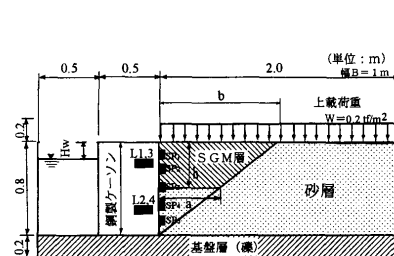
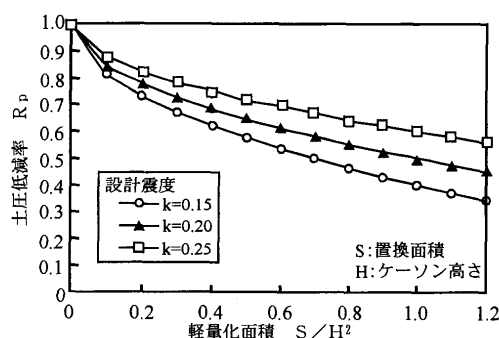
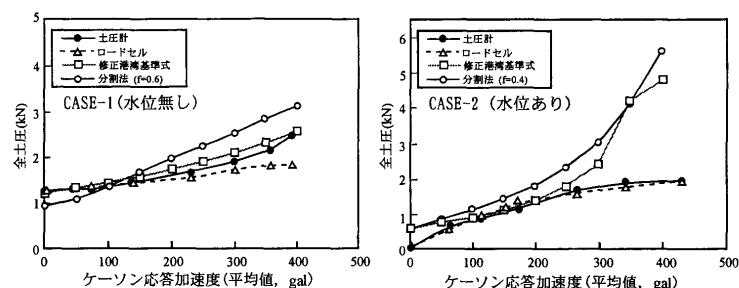
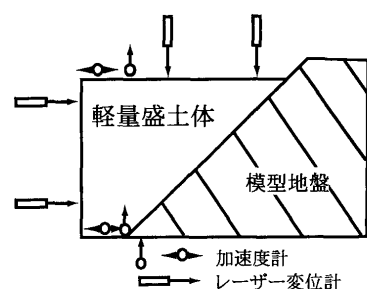
前述したように阪神大震災では、被災したケーソン岸壁の復旧<sup>34)</sup>に際して気泡混合処理土や発泡ビーズ混合軽量土が採用された。これらの工法が採用された理由としては、改良体以深の有効上載荷重を小さくできることや、浚渫粘性土の有効利用が可能であることが挙げられるが、それらに加えて、改良体自体が自立性を有する材料であるため、ケーソンに作用する常時の主働土圧が極めて小さいということも大きな理由の一つであった。一方で、地震時土圧も低減されると考えられるが、その研究例はそれほど多くはない。

奥村ら<sup>39),40)</sup>は、図—3.14に示すような気泡混合処理土を裏込め材に用いたケーソン岸壁の模型に対する振動台実験を行い、地震時土圧の低減効果に関する実験を行っている。未改良の地盤と比較した場合、軽量化処理を施すことによって、ケーソン躯体に作用する地震時土圧が大きく低減されることが確認されたほか、ケーソンの水平変位や沈下に対する抑制効果もあることを明らかにしている。特に、裏込め内に地下水面がある場合、ケーソンよりも応答が小さいため、ケーソンの応答加速度が大きくなっても土圧が増大することはなく、結果的に改良体が慣性力によってケーソンを押し出すような挙動は示さず、計測される最大土圧もすべて受働方向に働いていたことを報告している。

土田ら<sup>41)</sup>は、図—3.15に示すような模型地盤に対する加振実験を行い、従来の港湾基準によって算定される地震時土圧との比較を行っている。計算土圧としては、震度法に基づいて主働土圧が求められているため、実験結果としては、実測最大土圧と比較している。その結果、裏込めを軽量土で置換えられたケーソンに働く土圧は、従来の土圧に比べて、大きく低減されており、裏込め内の地下水位面の高さや改良形状の違いによって、土圧の



図—3.14 ケーソン護岸に対する模型実験と試験結果<sup>40)</sup>

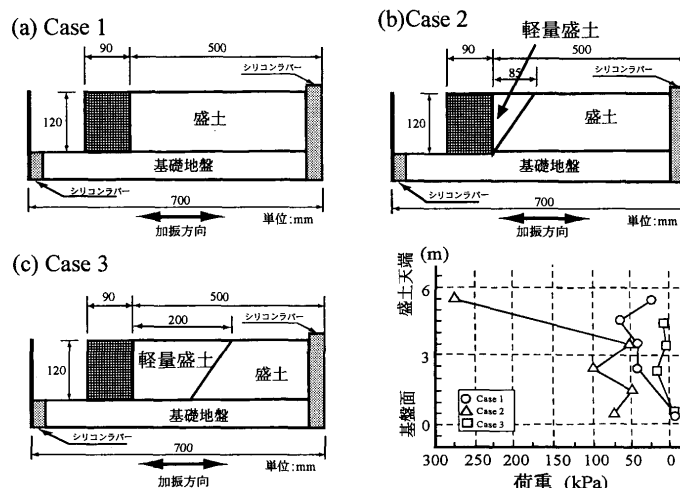

図—3.15 ケーソン背面改良地盤の振動台実験の断面と地震時土圧特性<sup>41)</sup>

図—3.16 軽量化面積と土圧低減効果<sup>42)</sup>

図—3.18 急傾斜斜面の軽量盛土の模型断面<sup>45)</sup>

低減率が異なってくることも明らかにしている。さらに土田<sup>42),43)</sup>は破壊モードを考慮して土圧を計算する手法として、分割法による土圧計算法を提案しており、この手法を用いた計算土圧と実測土圧がよく一致することを示している。その前提の上で、幾つかのモデルケースを想定して、設計震度の異なる条件のもとで試算を行い、ケーソン背面を軽量材料で置換えた場合の、正規化された改良率（断面における置換え面積をケーソン高さの2乗で除したもの）と土圧低減率の関係を図—3.16のように求めている。

橋台の裏込め材として軽量地盤材料を用いた場合の地震時土圧の検討例では、稲垣<sup>44)</sup>が図—3.17に示すような改良パターンに対して、土圧特性を調べる遠心模型実験を実施している。それによると中規模の震動レベルの範囲内においては、常時と同様に地震時土圧も低減することを確認されているが、その改良形状によっては、改良範囲が広くても橋台に作用する土圧の低減効果が減少する場合があることも読み取れる。

## ii) 振動特性

一方、軽量土の地震時土圧特性とは別に、軽量土で改良された地盤の地震時振動特性を明らかにする実験も行われている。


図—3.17 橋台背面を軽量化した模型地盤と土圧特性<sup>44)</sup>

中野<sup>45)</sup>は、図—3.18に示すような急傾斜斜面上の高盛土を想定した動的遠心載荷実験を行い、発泡ビーズ混合土ならびに気泡混合処理土の地震時挙動、特に応答特性に関する検討を行っている。地山部と盛土肩部の加速度応答記録によると、水平方向加振に対して、同方向の応答加速度が増幅されているのは当然ながら、ある加速度レベルを境に、鉛直方向の加速度応答も見られ、その増幅率も水平方向と同等かそれ以上となり、軽量体の回転モードが卓越する場合もあるとの結果を得ている。これは、盛土体と地山が独立して応答していることにほかならず、両者の境界部で滑動が生じたり、盛土体底部で鉛直方向支持力破壊が生じることによって、残留変形が生じ、盛土体に顕著なクラックややすべり面などの変状が生じることで、こうした独立挙動がより顕在化する可能性がある。

図—3.17で示した稲垣<sup>44)</sup>の実験では、地震時土圧の検討のほかに、加速度応答特性についても検討がなされている。図—3.19には、前出の図—3.17に示した形状の模型地盤の橋台部および橋台直近で得られた加速度応答倍率を示す。これによると、改良体の存在によって加速度増幅率が改善され、改良幅が大きくなるほど加速度の応答倍率は低くなっている。しかし、背後地盤の振動応答に着目すると、改良幅が比較的小さく、改良体の底部と橋台が接しているケースで最も大きな応答を示す結果となっている。その影響は、最大土圧の大きさにも表れており、応答の増幅特性に呼応して改良範囲の小さいケースが最大土圧を示す結果となっている。これらの実験結果は、軽量材料の動的問題を考えるうえで、幾つかの

講 座

問題を提起している。すなわち、

- 対象構造物に対する土圧という観点からは、背後地盤に軽量土を用いることによって、土圧の低減効果が期待できる。

- 応答特性に関しても、改良効果が認められるが、その形状によっては、改良体の独立挙動によって、本来の地盤とは異なる応答に注意が必要な場合もある。

- 改良体と構造物の応答特性の違いから土圧が主働的に働く場合と受働的に働く場合とがある。

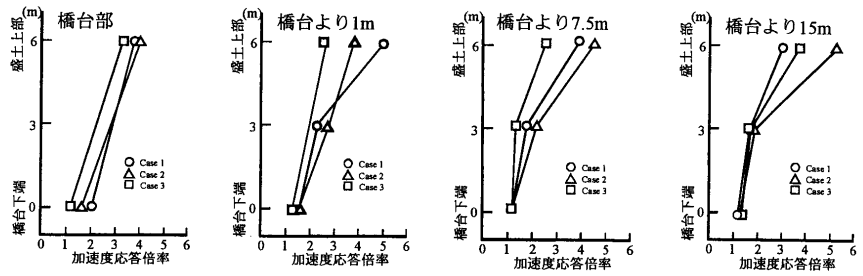
- レベル2地震動のように大規模地震の際に、構造物自体に滑動が生じたり、改良体に破壊が生じた場合の挙動を確認する必要がある。

といった問題点を解明してゆく必要がある。

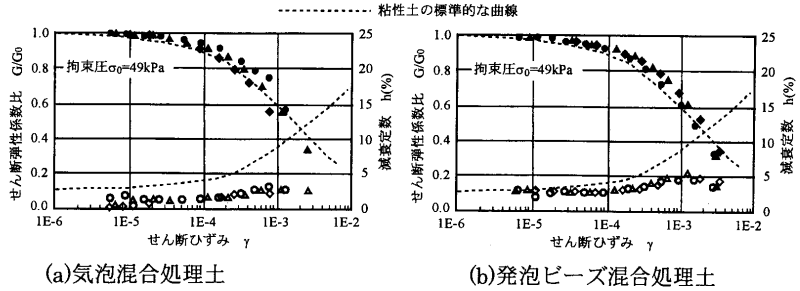
(3) 動的物性を求める実験

前述したように、一般に軽量土は固化材で安定処理されるため、通常土に対して静的強度は大きい。したがって動的強度も大きいものと考えられるので、地震時などの動的環境下においては、地震時の応答特性を把握する際に必要となる動的変形特性を明らかにすることがより重要となってくる。菊池ら<sup>46)</sup>は繰返し三軸試験によって気泡混合処理土ならびに発泡ビーズ混合土の動的変形特性を求める実験を行い、図—3.20のような、せん断弾性係数と減衰定数のひずみ依存性 ( $G \sim \gamma$ ,  $h \sim \gamma$ ) の関係を得ている。それによると、せん断弾性係数比  $G/G_0$  のひずみ依存性は、どちらの材料も平均的な粘性土 ( $I_p \geq 30$ ) の曲線とはほぼ同等であるが、減衰定数  $h$  は低い傾向にある。また拘束圧を変えた試験結果<sup>46)</sup>から、若干の拘束圧依存性も見られるようである。一方、ビーズ混合土と気泡混合土を個別に比較すると、ひずみ増加に伴う剛性の劣化は、気泡混合土の方がビーズ混合土よりやや低いひずみレベルから生じはじめる。一方、減衰定数は気泡混合土の方がビーズ混合土に比べて全般的に小さい傾向にある。また、表—3.6には同時に行われた超音波速度試験<sup>46)</sup>によって求められた軽量混合処理土の動ポアソン比と動弾性係数を示す。

三嶋ら<sup>47)</sup>は、供試体の初期強度の異なる幾つかの気泡混合土に対する動的変形特性試験を行い、図—3.21に示すような結果を得ている。この結果を見ると、気泡混合土の剛性は、供試体条件に関係なく、せん断ひずみで  $\gamma = 10^{-3}$  レベル付近を超えると、ほぼ一定値に収れんしており、逆に剛性劣化のひずみ依存性という観点からは、軽量土の初期強度によって  $G \sim \gamma$  曲線の形状が大きく異なることを示唆している。ただし、この  $\gamma = 10^{-3}$  ( $\gamma = 0.1\%$ ) というひずみレベルは、一軸圧縮試験等で得られる静的破壊ひずみにおおむね一致していることに注意



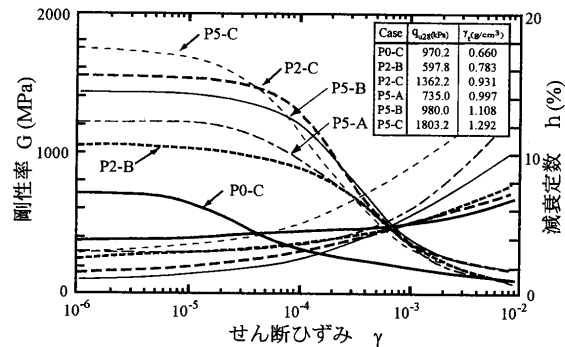
図—3.19 橋台モデルの加振実験における加速応答比率<sup>44)</sup>



図—3.20 軽量混合処理土の動的変形特性試験結果<sup>46)</sup>

表—3.6 超音波速度試験結果<sup>46)</sup>

|       | $V_p$<br>(km/s) | $V_s$<br>(km/s) | 動ポアソン<br>比 $\mu_d$ | 動弾性係数<br>$E_d$<br>(kN/cm <sup>2</sup> ) |
|-------|-----------------|-----------------|--------------------|-----------------------------------------|
| 気泡    | 0.84~0.88       | 0.23~0.25       | 0.45~0.46          | 21.6~22.5                               |
| 発泡ビーズ | 1.04~1.18       | 0.31~0.33       | 0.45~0.46          | 34.3~39.2                               |



図—3.21 気泡混合処理土の動的変形特性試験結果<sup>47)</sup>

しなければならない。また、三嶋ら<sup>47)</sup>の研究では、①気泡混合土のせん断剛性のひずみ依存性曲線は、ビーズ混合土のそれと良く類似していること、②減衰定数のひずみ依存性では、気泡混合土の方がビーズ混合土より顕著に増加していることも明らかにしている。

このように図—3.20と図—3.21に見られる両研究の結果は微妙に異なっていることから、今後もこの種の実験を行い、データを蓄積する必要があると考えられる。

一方、土圧低減や液状化防止などの目的でケーソン裏込めなどに軽量地盤材料を用いる場合では、改良体が地下水面以下の地盤に施工されることも想定される。こうした条件の下では、軽量土は水浸下で打設、養生されることとなり、動的変形特性に及ぼす水浸の影響も明らかにしておかなければならない。図—3.22は、石炭灰を主材料とする気泡混合土を気中で打設し、水浸状態で養生した供試体に対して動的変形特性試験<sup>47)</sup>を実施した結

果である。ここでは  $G \sim \gamma$ ,  $h \sim \gamma$  関係を気中養生した場合の結果と比較して示す。これによると、水浸の影響で初期剛性  $E_{\max}$  の値は、気中養生を行った場合のそれに比べ約25%程度低下している。しかし、剛性低下率のひずみ依存性曲線については、気中養生、水浸養生ともに顕著な違いは見られないようである。一方、減衰定数については、水浸養生された供試体のほうが幾分大きな値を示している。

こうした混合軽量土の動的特性を求める実験は、施工法や施工場所の多様性から、地盤条件や施工条件に応じたさまざまなデータの蓄積が望まれる。しかし一方で、実験の実施上幾つかの問題点も挙げられる。

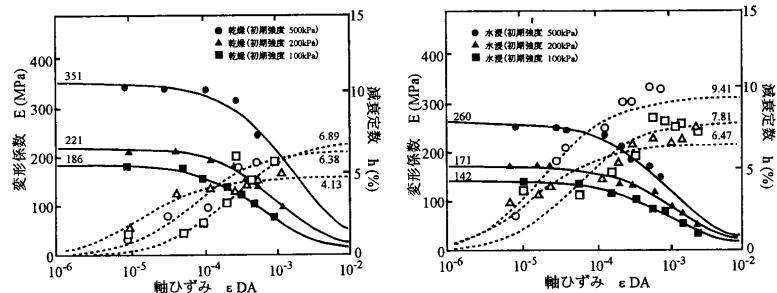
例えば、気泡混合土を水中施工すると、その気泡内に打設深度に応じた静水圧を包含して固化することは知られている。ただし、これまでの実験例では、大気圧下で打設され（気泡内部は大気圧）、固化された供試体に対して、有効拘束圧だけを原位置の状況に合わせて試験が実施された例が多い。また、混合軽量土は固化材を含んでいるため、ひずみレベルが大きくなってくると、圧縮側と伸張側の挙動が異なることも予想される。通常の繰返し載荷試験を行った場合、応力ひずみの履歴ループが対称型にならず、減衰定数を過小評価する傾向にある。こうした場合、中空ねじり試験等を行うことも考えられるが、その実施例は少ない。また、軟弱地盤上の低盛土や浅部改良の場合には、自重の小ささも加わって、極低拘束圧になると考えられるが、そうした条件下で、大きな地震力を載荷することは、現状の試験方法では難しい。

#### (4) 軽量地盤の動的挙動

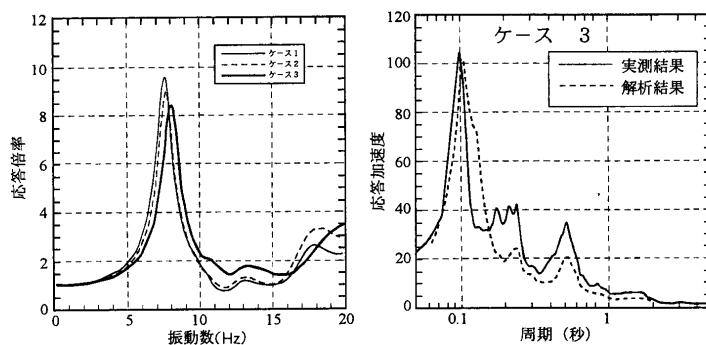
これまで述べてきたように、軽量地盤材料は一種の改良土であり、原則として固化材を含んでいるため、その動的強度は大きく、液状化といった破壊現象が生じる可能性は低い。しかし動的現象としては、動的強度以外に振動特性についても十分に明らかにされなければならない。

軽量土の振動特性に関する物性としては、微小変形特性やそのひずみ依存性（ $G \sim \gamma$ ,  $h \sim \gamma$  関係）などが実験的に明らかにされてきている。しかし軽量地盤の場合には、一般の土構造物とは異なり、軽量土のマスが剛体として挙動することも予想されるため、材料（要素）としての動的性質のみでなく、地盤全体としての地震時挙動についても検討する必要がある。さらに、軽量化が周辺の構造物（土構造物を含む）に与える影響についても検討を要する場合も考えられる。

軽量材料を用いて施工された地盤では、その自重が軽くなること、および剛性が高くなることから、固有周期



図—3.22 気泡混合処理土の動的変形特性に与える養生条件の影響に関する試験結果<sup>48)</sup>



図—3.23 気泡混合処理土地盤の伝達関係と加速度応答スペクトル<sup>49)</sup>

は従来の地盤に対して短くなることが一般的である。地盤の地震応答は、入力動の周期特性と地盤の固有周期によってその増幅特性に大きく影響を与えるので、構造物の震動被害を考えるうえでは、改良体の固有周期との関係が非常に重要になってくる。仮に、地盤が軽量化され、固有周期が短くなったとすると、地震動の長周期成分に対する応答性は低くなるが、中規模の短周期の地震動が入力されれば、逆に応答は大きく増幅される。図—3.23 には、川井田ら<sup>49),50)</sup>によって実施された気泡混合土地盤の遠心模型実験（図—3.17）とその数値解析から求めた伝達関数と加速度応答スペクトルの一例を示している。各ケースごとの伝達関数の比較では、応答倍率、卓越振動数ともに改良範囲に応じて変化していることを示している。

軽量地盤上に存在する構造物まで考慮に入れるとするならば、対象となる構造物にとっては、軽量地盤での応答波形は入力波形となる。そうした場合、短周期成分の卓越した入力動が加わることとなり、構造物の規模や固有周期によっては、上部工に被害が生じることも考慮する必要がある。これは、軽量地盤上に存在する構造物に限らず、軽量土と隣接した構造物に対しても同様の検討を要することを意味している。

そうした観点からも、軽量地盤の挙動を解析的に明らかにする必要性が今後重要になって来ると考えられる。前出の遠心載荷実験の検討例でも示されたように、改良範囲の形状や大きさによって土圧の大きさに違いがあることや、軽量化することによって震動特性に変化が生じることを定量的に評価するためには、模型実験や室内要素試験に加えて、解析的な検討を行う必要がある。

例えば動的変形特性は、等価線形法に基づく地震応答

## 講 座

解析に用いるパラメーターを決定するための試験であるが、こうした動的解析を実施するにあたっては、幾つかの問題点を整理する必要がある。まず、圧縮と引張りで強度や挙動が異なる非線形性の強い材料に対して動的解析を適用することを考える。等価線形解析の結果に与える影響から評価すると、材料の減衰特性は、地盤応答の周期特性には影響を与えるものの、応答加速度や最大変位への影響は比較的小さい。したがって、材料のスケルトンがうまく表現されていれば、改良体自体の応答加速度や応答変位は比較的良好に再現できる。特に、材料が破壊に至らないひずみ領域においては、実務上大きな問題とはならない場合も多い。ただし、前述したような周辺構造物への影響については、周期特性が重要であることから、減衰特性もより正確に表現されていなければならない。さらに、材料が破壊に至るような大きな地震力加わった場合には、通常は加速度はそれ以上増幅しないが、等価線形解析ではこうした挙動が表現できないため、結果的に軽量土の耐力を過小評価することになってしまう。

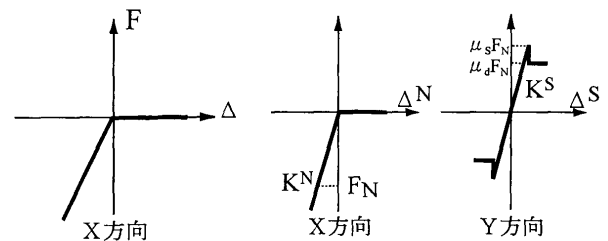
こうした問題に対して、非線形解析を行う手法も考えられるが、現状では、軽量土の破壊モード等をうまく表現する非線形モデルは十分に確立されていないのが現状である。例えば、軽量材料による改良体と一般地山部との間で生じるロッキング振動やすべり、はく離等についても、図-3.24に示すようなばね要素を導入して解析する試み<sup>50)</sup>もなされているが、十分な成果を上げていえるとは言い難い。今後、設計の際にレベル2地震動などを考えるうえでは、こうした材料の破壊をも考慮したモデルの開発の必要性も高まってくるものと考えられる。

## (5) おわりに

軽量地盤材料の動的物性のうち、交通荷重などを想定した繰返し載荷時、および繰返し載荷後の静的挙動については、次回以降に詳述する。

## 参 考 文 献

- 34) 松永・安達・土田：軽量混合土を利用した岸壁の復旧：土木施工，Vol. 37, No. 7, pp. 65～70, 1996.
- 35) 森・渡邊・土橋・西田：発泡ビーズ混合軽量土の橋台背面裏込めへの適用，土木学会第51回年次学術講演会概要集，pp. 670～671, 1996.
- 36) 建設発生土利用促進検討委員会編：発生土利用促進のための改良工法マニュアル，1997.
- 37) 沿岸開発技術研究センター編：港湾・空港における軽量混合処理工法マニュアル，1999.



(a) はく離を表現するばね (b) すべり浮上りを表現する一對のばね

図-3.24 はく離やすべり浮上りを表現するばねの概念<sup>50)</sup>

- 38) 日本道路公団：気泡混合軽量土を用いた軽量盛土工法の設計・施工指針，1996.
- 39) 奥村・稲垣・舟田・高橋・山本：軽量混合処理土を裏込め材に用いたケーソン岸壁の振動台模型実験，第31回地盤工学研究発表会講演集，pp. 1197～1198, 1996.
- 40) 奥村・稲垣・舟田・岸田・山本・緒方：振動台模型実験における軽量混合処理土の土圧特性，第32回地盤工学研究発表会講演集，pp. 779～780, 1997.
- 41) 土田：港湾空港事業における軽量混合処理土工法の開発と適用事例，港湾技術研究所報告，第38巻，第2号，1999.
- 42) 土田・巻潤・平野・高橋・八木・佐々木：分割法による軽量混合処理土の土圧算定—実験値と計算値の比較—，第32回地盤工学研究発表会講演集，pp. 781～782, 1997.
- 43) 土田・輪湖・福原：軽量固化体による地震時土圧低減効果と土圧分布について，第32回地盤工学研究発表会講演集，pp. 1149～1150, 1997.
- 44) 稲垣・川井田・大保・吉迫：裏込めを軽量化した橋台の地震時挙動に関する検討（その1 動的遠心模型実験結果），第33回地盤工学研究発表会講演集，pp. 117～118, 1998.
- 45) 中野・三木・小橋：急傾斜斜面上の軽量盛土の耐震性に関する実験的考察，第35回地盤工学研究発表会講演集，pp. 2169～2170, 2000.
- 46) 菊池・竹内・千代田・鏡田・白井：軽量混合処理土の動的変形特性，第32回地盤工学研究発表会講演集，pp. 2575～2576, 1997.
- 47) 三嶋・殿垣内・杵山・似内：気泡セメント盛土材(FCB)の配合剤による動的強度特性，第28回土質工学研究発表会講演集，pp. 2635～2636, 1993.
- 48) 安原・金沢・規矩・川野・山崎：石炭灰気泡軽量土の動的変形係数について，第33回地盤工学研究発表会講演集，pp. 115～116, 1998.
- 49) 川井田・稲垣・大保・堀越・吉迫：裏込めを軽量化した橋台の地震時挙動に関する検討（その2 弾性応答解析による効果の検討），第33回地盤工学研究発表会講演集，pp. 119～120, 1998.
- 50) 緒方・稲垣・大保・堀越・吉迫：裏込めに軽量地盤材料を使用した橋台の地震時挙動—遠心実験と動的解析による検討—，軽量地盤材料の開発と適用に関するシンポジウム発表論文集，pp. 225～230, 2000.