

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3)

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

堀 内 澄 夫 (ほりうち すみお)
清水建設(株)技術研究所

大 谷 順 (おおたに じゅん)
熊本大学大学院自然科学研究科

3.2.3 動的物性(2)

前回の3.2.2では、軽量地盤材料の動的物性のうち、主に地震力を受けたときの軽量地盤の諸特性について述べてきた。一方で、盛土や基礎といった土構造物が受ける動的な荷重としては、こうした地震荷重だけでなく、車両の通過に伴う交通荷重や波浪による繰返し荷重も挙げられる。こうした繰返し荷重は、地震荷重などに比べると比較的小さく、振動数も異なるが、その継続時間ははるかに長く、その結果として地盤材料の疲労破壊を招くこともある。

軽量地盤材料の従来からの適用用途を考えると、継続的な繰返し荷重を受けたときの挙動や、繰返し荷重が、その後軽量土の力学特性に及ぼす影響に関する検討は、設計・施工上の重要な課題の一つである。

(1) 実務面から見た軽量地盤の耐久性能

軽量地盤材料の疲労特性に関する研究は、主として材料の開発機関が中心となって進められており、発泡ビーズ混合土、気泡混合土ともに多くの実施例^{51)~56)}がある。例えば旧建設省を中心に開発された混合軽量土の場合では、森ら⁵¹⁾が発泡ビーズ混合土の路床、路体への適用を考慮して、破壊強度の50%程度の繰返し応力条件下での繰返し荷重疲労試験を行っている。図-3.25には、繰返し荷重に伴う累積変位と弾性係数の変化を示しているが、山砂および関東ロームのいずれを母材とした軽量土においても、顕著な変位の累積や強度低下は見られず、安定した性状を保っており、実務上の耐疲労性に問題はないと結論づけている。

気泡混合軽量土においても、青山ら⁵²⁾が同様の試験を行っており、初期強度に対する荷重応力比が0.56以下では、最大 10^5 回程度の繰返し荷重の影響は無視でき、繰返し荷重によって軽量材料の圧縮剛性は高くなると結論づけている。

また、三嶋ら⁵³⁾は道路公団が開発した気泡混合土(FCB)に対して疲労試験を行い、繰返し荷重による強度劣化の検討を行っている。図-3.26は、初期強度の30%~75%の異なる応力レベルで繰返し荷重を実施し、その前後における一軸圧縮強度を比較したものである。総じて低い応力レベルの繰返し荷重のもとでは、繰返し荷重を行った後も軽量土の強度はほとんど変わらないか、やや増加する傾向を得ている。

湯ら⁵⁴⁾は、旧運輸省が中心となって開発した気泡混

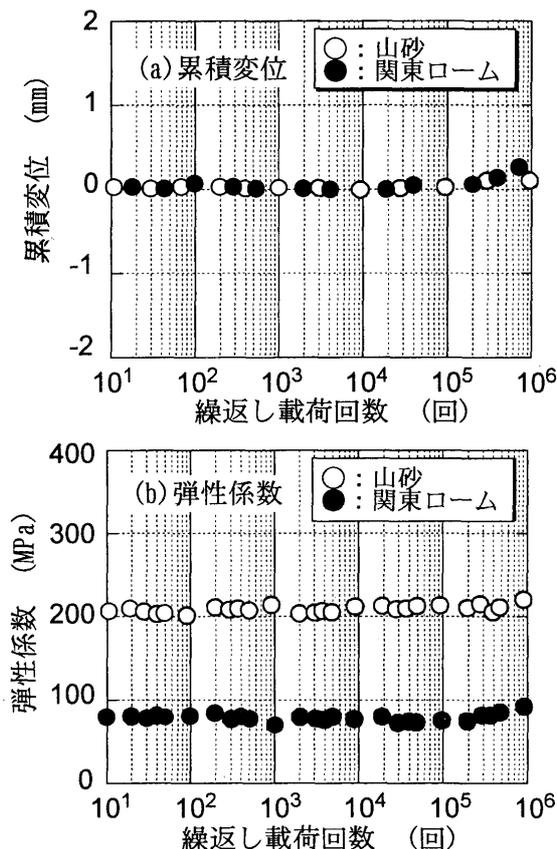


図-3.25 繰返しに伴う累積変位と弾性係数⁵¹⁾

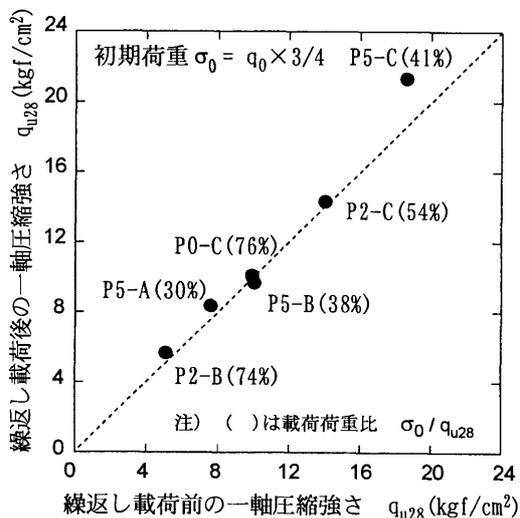
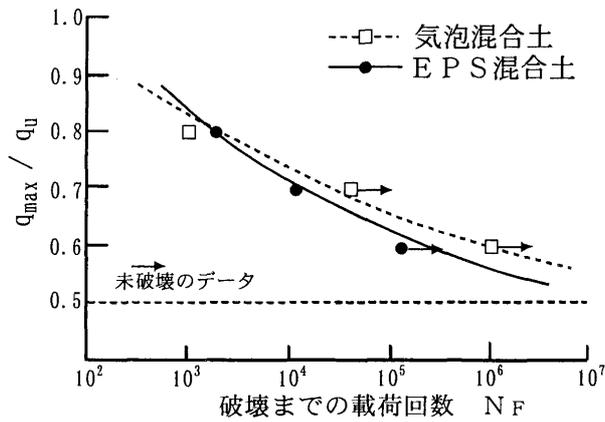


図-3.26 繰返し履歴前後の一軸圧縮強度の変位⁵³⁾

講座



図—3.27 繰返し荷重比と破壊までの载荷回数⁵⁴⁾

合処理土、発泡ビーズ混合処理土に対する耐久特性を調べており、図—3.27に示すような、荷重の大きさと破壊に至る载荷回数の関係から、圧縮強度の8割程度の大きな繰返し荷重では、約1000回程度の荷重によって破壊に至るが、繰返し荷重の大きさを圧縮強度の半分程度に制限すれば、軽量混合処理土の耐久性に問題はなく、その傾向は発泡ビーズ混合土、気泡混合土ともに共通しているという結論を得ている。

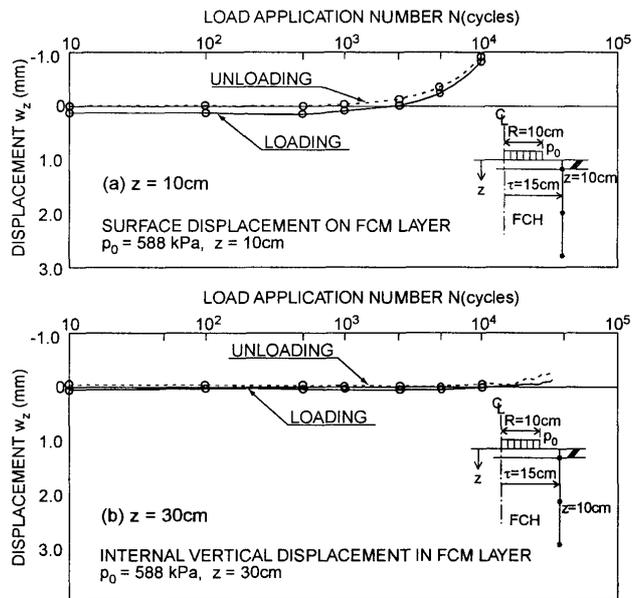
(2) 軽量地盤材料の繰返し荷重下での挙動

前述の事例では、対象材料や配合、適用用途が明確になっており、設計上、実務上の安全性の観点から、耐久性を検討したものであった。一方で、母材や配合等の各種条件が異なれば、繰返し载荷挙動や耐久性も違ったものになるはずである。

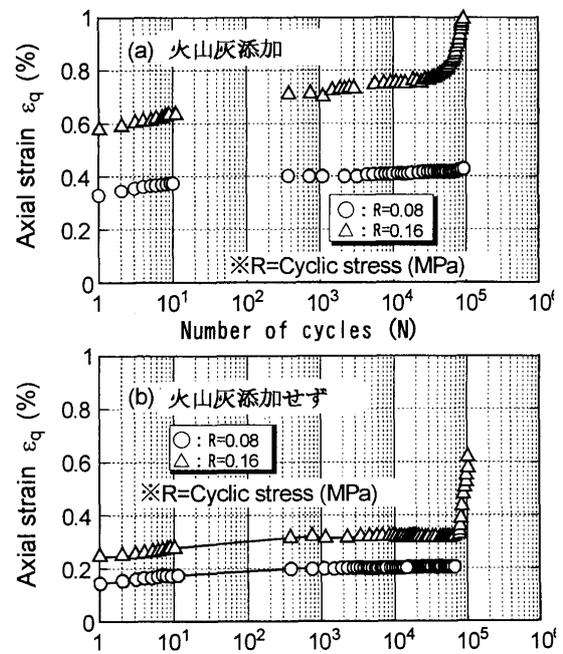
例えば、石炭灰を母材とした気泡混合土では、一軸圧縮強度の30%程度の繰返し応力を受けても強度低下がもたらされるといった事例⁵⁵⁾もある。また、水平土圧を軽減する目的で用いられたはずの軽量土が、繰返し荷重によってセメンテーションが切れることにより、逆に K_0 値が増加してしまうといった負の効果もあり得るといった実験例⁵⁶⁾もある。

こうした複合材料の繰返し強度特性や挙動を解明するには、応力レベルや繰返し回数による規定だけでなく、さまざまな要因の検討に適用できるような、挙動メカニズムに着目した考察も必要であると考えられる。

軽量土の繰返し荷重挙動に関し、比較的早い時期に検討した例として山内ら⁵⁷⁾の気泡モルタルによる模型実験がある。この実験では、地中部に気泡モルタル層を有する模型地盤の地表面から繰返し荷重を行い、気泡モルタル層の上部および内部の変形を連続的に計測している。図—3.28には各载荷サイクルにおける荷重時、除荷時のピーク変位を示している。これによると、破壊応力の75%程度の繰返し荷重においても、载荷回数が少ない間は、気泡モルタル層の上部変位、内部変位ともに一定の振幅内に収まっており、気泡モルタル層は全体として弾性的挙動を保っていることがわかる。载荷回数が増えてくるとモルタル層上部で回復しない変形が累積し始めるが、その絶対量は大きなものではない。こうした傾向は、通常の締固め土や安定処理土のそれとよく類似して



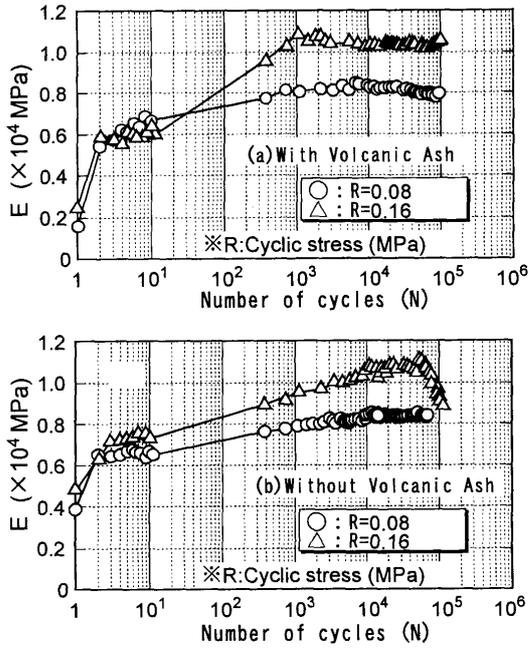
図—3.28 繰返し回数とFCM層内部の鉛直変位の関係⁵⁷⁾



図—3.29 繰返し荷重に伴う軸ひずみの累積⁵⁵⁾

いる。しかしながら、1サイクル中の変位振幅には大きな増加は見られず、また、気泡モルタル層内部では、モルタル層上部に比べて、かなり遅れて変位の累積が始まっている。こうした結果から、この試験の载荷回数の範囲では、繰返し荷重によって、気泡モルタルが劣化して、変形が増加したというよりは、気泡を抱いた骨格構造が破壊されたものと考えられる。

図—3.29には、石炭灰を用いた気泡混合土の繰返し試験における軸ひずみの履歴⁵⁵⁾を示す。この実験では、同一配合条件の供試体に対して、応力比の異なる繰返し荷重を行っている。いずれのケースにおいても、繰返し回数が100回程度までの領域では、軸ひずみは徐々に累積してゆくが、その後、その増加傾向には鈍化が見られる。しかし、さらに繰返し荷重を加えると、応力比の大きなケースでは、急激にひずみが進展している様子が見



図—3.30 繰返し載荷に伴うヤング率の変化⁵⁵⁾

られ、前出の実験結果とはその傾向を異にしている。図—3.28の気泡モルタルの模型実験結果⁵⁷⁾とも考え合わせると、

- a) 荷初期のひずみ増加の過程は気泡を包含する骨格の破壊が進行してゆく段階で、比較的小さな応力比でも破壊は進行する。
- b) 気泡がある程度収縮した後は、母材本来の強度が強く発現されるため、ひずみの増加は鈍化する。その傾向は、当然、加える繰返し応力比が小さいほど顕著である。
- c) 一方、大きな応力で、その後も繰返し載荷された場合には、供試体のマトリックス部で疲労破壊が生じ、再び急激にひずみが増加する。

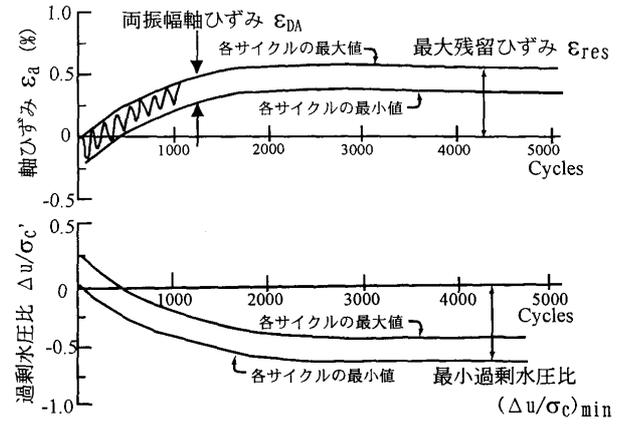
といった挙動が推察される。

また、この実験では石炭灰による気泡混合土を作成する際の細骨材として、火山灰を使用したものに対しても同様な実験を行っている。細骨材として火山灰を添加したものは、ひずみ増加の傾向は連続的になり、その絶対値も大きくはなるが、破壊が生じる段階でのひずみ増加は、無添加のものに比べて緩やかで、粘性を付与することによって破壊形態が延性的になっている。

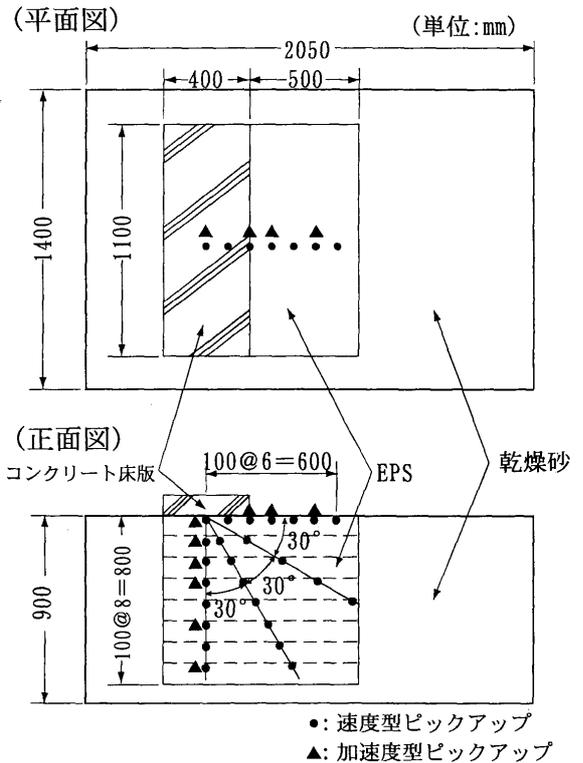
一方、軽量土の繰返し挙動を明らかにするうえでは、繰返し載荷に伴う強度の変化のみならず、剛性の変化や間隙水圧挙動も合わせて重要である。図—3.30は、図—3.29で紹介した気泡混合土の繰返し載荷実験⁵⁵⁾における、繰返し載荷過程におけるヤング率の変化を示したものである。

気泡の変形が始まる初期の段階では、剛性は徐々に増加してゆくが、気泡の変形が収れんして母材の強度が卓越し始めると、その後の剛性に大きな増加は見られない。しかし、応力レベルの高いケースでは、供試体が破壊し始めることによって剛性は急激に低下することになる。

図—3.31は、発泡ビーズ混合土の非排水繰返し試



図—3.31 発泡ビーズ混合土の非排水繰返し試験結果の一般的な傾向⁵⁸⁾



図—3.32 EPSの振動減衰に関する模型実験⁶¹⁾

験⁵⁸⁾の際の軸ひずみと間隙水圧の変化を示している。この結果では、繰返し回数が2000回程度までの過程で初期の永久変形が発生し終えている。永久変形が生じた以降は、繰返し応力に応じた弾性応答が生じているだけであり、この荷条件の範囲内では、供試体の疲労破壊は生じていない。一方、過剰間隙水圧も軸ひずみに呼応して、荷初期段階で蓄積され、その後は定常的なレスポンスを示している。ただし、蓄積される過剰水圧は負の値を示している。一般的なビーズ混合土は収縮性の材料であるにもかかわらず、見かけ上、膨張性土のような振舞いをしている。

こうした軸ひずみと負の間隙水圧の蓄積は、土粒子同士、あるいは土粒子とビーズ間の相対すべりに起因する現象と考えられる。また、発泡ビーズ混合土の場合には、圧縮性・変形性が著しく異なるビーズとの複合材料であるため、せん断に伴ってビーズが収縮し、その空隙部に

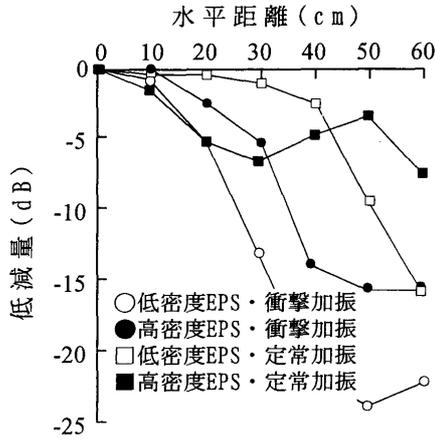


図-3.33 EPSの振動減衰効果⁶¹⁾

マトリックス（土粒子）中の間隙水を抱き込んでしまうことが見かけ上の負の水圧を生じさせた原因と考えられる。こうした事実は、水中施工や水浸条件下で軽量土を用いるうえで、さらなる挙動の複雑さを示唆しているものである。

このように、軽量地盤材料の耐疲労性は、その荷重条件は当然のことながら、母材の特性や養生条件、施工条件などの影響を受けている。さらに、繰返し载荷時挙動が幾つかのステージで異なるなど、気泡の空気量や発泡ビーズの圧縮性、粒子間のセメント結合力といった複合材料固有の要因の影響も決して小さくはないといえる。今後のデータの蓄積が待たれるところである。

(3) 振動・騒音制御対策効果

動的特性とは少し異なるが、超軽量地盤材料の発泡スチロールや発泡ウレタンは交通車両の走行に伴う振動や騒音対策（防振や防音対策）として利用される事例⁵⁹⁾もある。この種の材料が空隙を有するためにダンピング効果が大きく制振効果があるためと説明されている⁶⁰⁾。特に、音響インピーダンスの小さい合成樹脂系の発泡材（EPSに代表される）が有効とされている。早川ら⁶¹⁾は、図-3.32に示すような模型地盤を用いた衝撃加振実験を行い、EPSの振動伝播特性ならびに防振特性を調べている。図-3.33にはEPS表面上の水平方向の振動減衰の効果を整理した結果を示している。振動源から離れるに従って、大きな減衰があり、特にEPSの密度が小さいほうが、その減衰効果が大きい。また、この傾向は、深さ方向の振動減衰においても同様である。大きい振動や騒音が依然として都市における重要な環境問題の一つであることを考えると、混合軽量土もこの種の問題への対応に利用される可能性があり、今後検討を要する事項であろう。

（規矩大義，安原一哉）

3.3 強度に及ぼす内部構造の影響

3.3.1 寸法効果

コンクリートや岩のような脆性的な材料では、内部のばらつきに起因する強度の寸法効果が知られている。コンクリートと同様にセメント処理土や気泡混合土につい

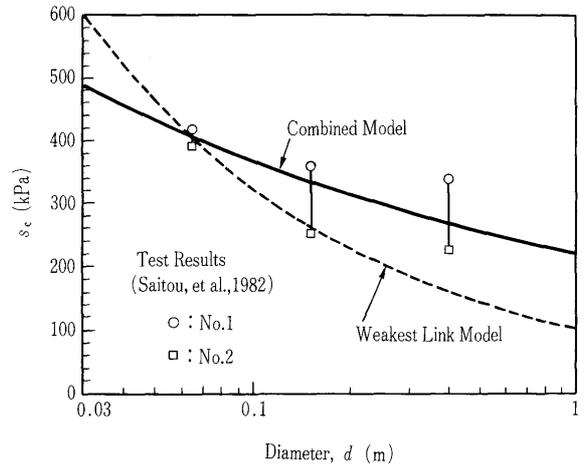


図-3.34 原位置サンプリング供試体の一軸圧縮強さの評価

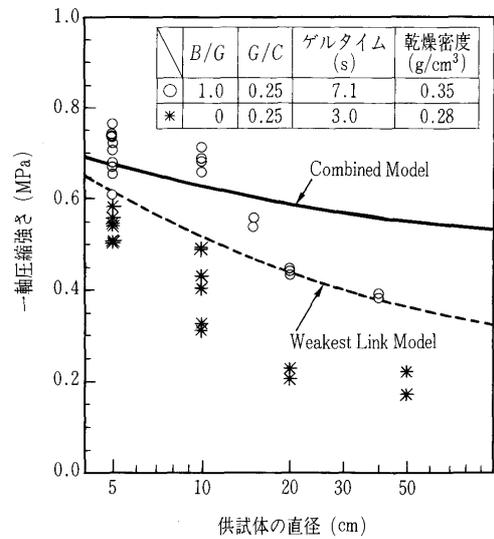


図-3.35 瞬結性気泡混合土強度の寸法効果

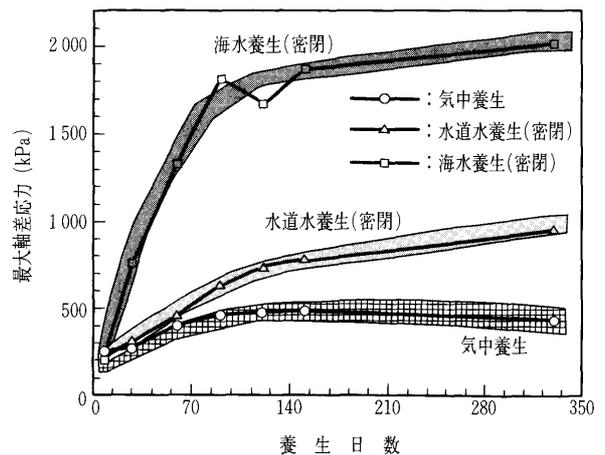


図-3.36 CU試験における最大軸差応力に及ぼす養生日数の影響

ても同様の傾向があると考えられている。図-3.34は原位置サンプリングしたセメント処理土の一軸圧縮強さと試料直径の関係であり、供試体寸法の増加に伴う強度低下は Combined Model と呼ばれる評価式で表現できている⁶³⁾。

図-3.35は瞬結性を持たせた気泡混合土の室内供試体

の場合である⁶⁴)。ここでの内部のばらつきは、①打継ぎ面、②材料分離、の2種である。気泡混合土へのベントナイトの添加は②を減少させる効果があり、ベントナイトの添加によって強度低下が減少する傾向が確認できる。図中には Combined model および Weakest link model での関係も示してあるが、ベントナイトを添加した材料の寸法効果はこれらの関係の中間に位置している。

3.3.2 養生条件

セメント処理土のような材料では養生条件によって発現強度が変化する。気泡混合土のように骨材成分が少ない材料ではセメントと水との反応生成物の量が強度を支配しており、養生条件による影響が大きくなる。図—3.36は養生雰囲気による発現強度への影響である⁶⁵)。海水で養生すると水道水の場合より100%以上高い強度が発現している。海水養生によるセメント処理土の強度への影響についてはその塩化ナトリウム分によって強度が70%程度高くなると報告されている^{66),67})。気泡混合土ではその効果が増大している。これに対して、気中養生では圧縮強度自体が低く、また材令100日以降の強度増加は望めない。

以上のように、気泡混合土の強度発現には水の存在と種類が大きく影響をあたえる。

3.3.3 内部構造

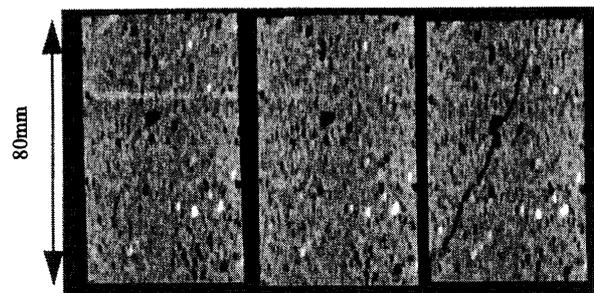
写真—3.1、3.2は図—3.36の試料の微視構造であ



写真—3.1 水道水養生（密閉）養生供試体片中心部の撮影写真

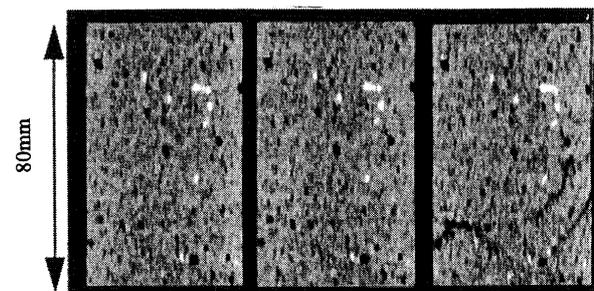


写真—3.2 海水養生（密閉）供試体片中心部の撮影写真



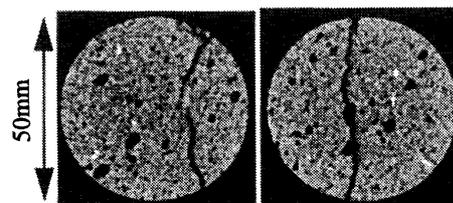
(a) 初期状態 (b) 応力ピーク前 (c) 応力ピーク後

写真—3.3 鉛直断面画像（サンプル A）



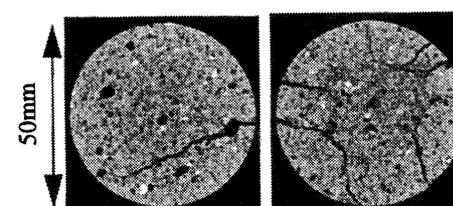
(a) 初期状態 (b) 応力ピーク前 (c) 応力ピーク後

写真—3.4 鉛直断面画像（サンプル B）



(a) 86.5 mm (b) 60 mm

写真—3.5 応力ピーク後の水平断面画像（サンプル A）



(a) 49 mm (b) 20 mm

写真—3.6 応力ピーク後の水平断面画像（サンプル B）

る⁶⁵)。海水養生試料では多くの針状の結晶生成物（エトリンガイト）が確認できているのに対して、水道水養生試料ではその量が少なく、また気中養生試料では確認できなかった。こうした化学反応の強弱が発現強度に大きく影響していると考えられる。

近年、X線CTスキャンによって気泡混合土の内部構造を観察する試みがなされている⁶⁸)。写真—3.3～3.6は圧縮過程でのクラックの発生状況である。気泡は写真中の黒い部分である。気泡部分は弱強度領域と考えられがちであるが、クラックの発生は必ずしも気泡部分を通っているわけではない。

(堀内澄夫, 大谷 順)

参考文献

- 51) 森・干田・西村・高橋・中村・松浦：発泡ビーズ混合軽量土の繰返し载荷による疲労特性，第48回土木学会年次学術講演会概要集，pp. 704～705, 1993.
- 52) 青山・新舎・高橋・久保・笠井・佐藤・古谷：気泡混合補強土の特性について—その2 力学特性—，第27回土質工学研究発表会，pp. 2485～2486, 1992.
- 53) 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.
- 54) 湯・奥村・石谷・鏡田・別所：軽量混合処理土の K_0 圧密および耐久特性，第31回地盤工学研究発表会，pp. 2495～2496, 1996.
- 55) 安原・佐藤・見郷・堀内・草刈・小田原：石炭灰を用いた気泡混合スラリー(4)—動的応力履歴の影響，第47回土木学会年次学術講演会概要集，pp. 1052～1053, 1992.
- 56) プラダン・濃添：繰返し载荷における軽量混合土の K_0 値の変動，第51回土木学会年次学術講演会概要集，III-B, pp. 518～519, 1996.
- 57) 山内ほか：気泡軽量盛土材の変形・強度特性，第23回土質工学研究発表会講演集，pp. 1993～1994, 1988.
- 58) 今井・プラダン・内山：発泡ビーズ混合土の水浸状態での繰返し载荷時挙動，第49回土木学会年次学術講演会，pp. 1604～1605, 1994.
- 59) 早川・松井：ブロックを用いた交通振動の軽減効果，土と基礎，Vol. 44, No. 9, pp. 24～26, 1996.
- 60) 鈴木浩平：振動を制する，日本機械工学会，オーム社，2000.
- 61) 早川・天野・竹下：発泡スチロールによる地盤振動の低減効果に関する実験，土と基礎，Vol. 38, No. 6, pp. 45～49, 1990.
- 62) 外山・川井田ほか：気泡セメント盛土材の強度特性，第27回土質工学研究発表会講演集，pp. 2497～2500, 1992.
- 63) 落合英俊・安福規之・大嶺 聖：混合地盤材料の開発とその力学的性能，軽量地盤材料の開発と適用に関するシンポジウム論文集，地盤工学会，pp. 137～148, 2000.
- 64) Horiuchi, S., Uchiyama, N., Odawara, T. and Yasuhara, K.: Flash-setting Lightweight Slurry—An Approach for Floating Island Construction, Materials in Civil Eng., ASCE, pp. 138～146, 1996.
- 65) 安原一哉・村上 哲・金澤浩明・飯久保励ほか：石炭灰を利用した気泡軽量土の強度・剛性と微視的要因の関係，軽量地盤材料の開発と適用に関するシンポジウム論文集，地盤工学会，pp. 149～154, 2000.
- 66) 長瀧重義・大賀宏行・谷口公一・染谷健司：フライアッシュを用いた新硬化体の海洋構造物への適用性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 9, No. 1, pp. 211～216, 1987.
- 67) Liu, H., Lu, Z. and Lin, S.: Composition and Hydration of High Calcium Fly Ash, 7th Int. Congr. Chem. Cem., Vol. 3, pp. IV.7～IV.12, 1980.
- 68) 椋木俊文・大谷 順・永留 健・菊池喜昭：異なる起泡剤を用いた気泡混合処理土の工学的特性評価，軽量地盤材料の開発と適用に関するシンポジウム論文集，地盤工学会，pp. 193～198, 2000.