

# 気泡混合軽量盛土の噴泥に関する研究

防災設計工学研究室 西 紀行  
指導教官 海野隆哉

## 1. はじめに

現在、鉄道の盛土材として使用されている気泡混合軽量土は、設計強度を 1500kPa に設定したものである。本研究室では、今後更なる軽量化をはかるにあたり設計強度を 1000kPa、500kPa に設定した配合について研究を行っている。昨年度、野上は設計強度 500kPa、1000kPa、1500kPa 配合を対象として、湿潤状態で振幅が設計路盤圧力に等しい繰返し載荷試験を行なった。1500kPa 配合では、噴泥を起さず沈下もまったく進行しないことを確認している。また設計強度 500kPa、1000kPa の盛土模型では、噴泥現象を確認した。本研究では、噴泥発生荷重を検証するために荷重条件を段階載荷とし湿潤状態における繰返し載荷試験を実施した。水の供給がなければ破壊や沈下の進行がないことから、噴泥発生の主原因は水であると言える。そこで、気泡混合軽量土の飽和供試体について、力学的特性を検証する要素試験を実施した。この模型試験と要素試験の結果から噴泥発生メカニズムを解明することを目的としている。

## 2. 湿潤状態での繰返し載荷試験

### 2-1. 軽量盛土模型の作製方法

試験で用いた軽量盛土模型（以下盛土模型）は表-1 の配合に基づいて作製した。盛土模型は固化材と粘土、水を練り混ぜスラリー状にしたものに気泡発生装置で発泡させた気泡を混入するプレフォーム方式で作製し、型枠に打設後、所定の強度が発現するまで気中養生を行った。なお、起泡材は動物性たんぱく質のものを使用した。盛土模型の寸法は長さ 0.9m × 高さ 0.5m × 幅 0.3m の直方体型で、載荷板面積は  $22\text{cm} \times 22\text{cm} = 484\text{cm}^2$  とした。給水は写真-1 のように載荷板付近に水を停留させる方法で行なった。



写真-1 給水状況

### 2-2. 試験方法

図-1 に試験概要図を示す。試験は全部で 7 ケース行い、ケース 1、2 については昨年度の試験の確認として、荷重条件を上載圧 70kPa、繰返し圧  $\pm 55\text{kPa}$  とした。ケース 3~7 は 1 荷重段階あたり 10 万回ずつの段階載荷で実施した。最大載荷圧に占める繰返し圧振幅の割合は、おおむね 80% である。また、ケース 1 を除くすべてのケースで、最初の 20 万回を水がない状態で上載圧 70kPa、繰返し圧  $\pm 55\text{kPa}$  に設定して予備載荷を実施した。

### 2-3. 試験結果

試験結果を図-2、図-3、図-4 に示す。図-2 は、噴泥発生後の繰返し回数と沈下の状況を示している。どのケースも噴泥発生後は少ない載荷回数で急激に沈下が進行するという結果となった。ここで、噴泥発生前の予備載荷および段階載荷による沈下については、載荷回数に関係なくほとんど沈下しないという結果が得られている。なお、ケース 4 は噴泥開始とともに供試体にクラックがはいり、水の供給が困難となり試験を終了したため図-2 には示すことができなかった。

図-3 では、段階載荷によって得られた噴泥発生時の最大載荷圧  $\sigma_{\text{max}}(\text{kPa})$  と一軸圧縮強さ  $q_u(\text{kPa})$  の関係を示す。ここで最大載荷圧とは上載圧と最大繰返し圧の和である。段階載荷を行なったケース 3~5 および段階載荷ではないがケース 5 と同じ条件で行いケース 5 より小さい載荷圧で噴泥を発生したケース 2 についても一緒にプロットし  $\sigma_{\text{max}} = 7.34q_u^{0.43}$  という関係で表すことができた。

最大載荷圧  $\sigma_{\text{max}}(\text{kPa})$  を一軸圧縮強さ  $q_u$  で除したものを荷重比として、図-4 に荷重比と沈下勾配の関係を示す。その結果、右肩上がりの傾向が見られ、噴泥発生時の荷重比が大きいほど沈下勾配は急勾配になることが分かった。

試験終了後、盛土模型を切断し水の浸透を目視で確認したところ、ほとんど水が浸透していないことが分かった。これにより、水は表面のごくわずかな層にのみ浸透して、噴泥を発生させていることが推測される。

表-1 配合(1m<sup>3</sup>当り)

Case	水セメント比	粘土	固化材	水	空気量
1,4	1.65	180	180	297	578
2,5	1.57	210	210	329	523
3	1.44	240	240	345	487
6	1.44	187	187	269	600
7	1.44	164	164	235	650



写真-2 噴泥発生状況

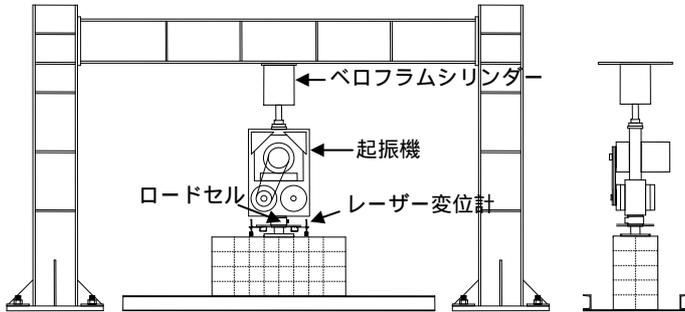


図-1 試験概要図

## 2-4.繰返し载荷試験のまとめ

湿潤状態での繰返し载荷試験より次のような知見が得られた。

1. 一軸圧縮強さ  $q_u$ (kPa)と最大载荷圧  $\sigma_{max}$ (kPa)の関係は  $\sigma_{max} = 7.34q_u^{0.43}$  で表すことができる。
2. 噴泥時の荷重比(最大载荷圧  $\sigma_{max}$  / 一軸圧縮強さ  $q_u$ ) が大きいほど沈下勾配も急になる。
3. 繰返し载荷試験の際、盛土模型にはほとんど水は浸透せず、表面のごくわずかな層しか浸透しない。

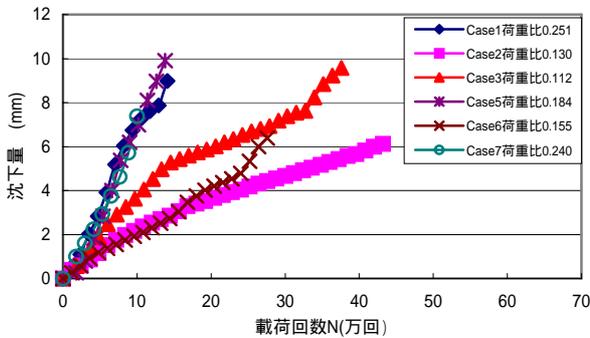


図-2 試験結果 (Case4 を除く)

## 3. 飽和供試体を用いた要素試験

### 3-1.飽和供試体の作製および飽和度算定方法

本試験では表-2 に示す設計強度 500kPa 配合を対象とした。使用した供試体 ( 5cm × 12.5cm ) は、同バッチで打設したものであり、養生条件も同じものである。また、負圧(-97kPa)を用いて供試体を飽和させた。ここでの飽和状態とは、図-5 に示すように骨格部分の空隙および気泡部分がすべて水で満たされた状態とした。飽和度を算定するにあたり次のような仮定を設けた。

- セメント重量の 25%の水がセメントと結合する。
- ブリージングは考慮しない。
- 吸水前後の体積は同一とする。

供試体の体積を測定し、供試体の飽和重量  $W_{sat}$ 、乾燥重量  $W_d$  を算出する。煮沸後の供試体重量を  $W$  とすると飽和度  $S_r$  は式-1 で表される。

$$S_r[\%] = \frac{W - W_d}{W_{sat} - W_d} \times 100 \quad \dots \text{式-1}$$

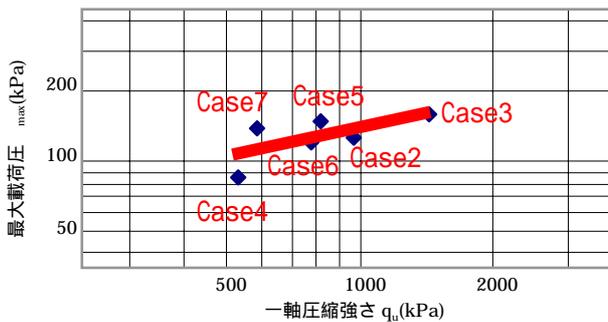


図-3 一軸圧縮強さと最大载荷圧の関係

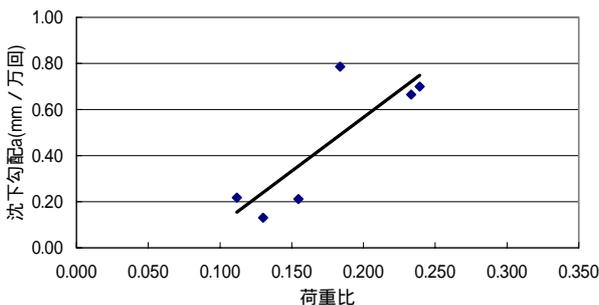


図-4 荷重比と沈下勾配の関係

表-2 500kPa 配合 (1m<sup>3</sup>当り)

設計強度 (kPa)	目標密度 (t/m <sup>3</sup> )	粘土 (kg)	固化材 (kg)	水 (kg)	気泡量 (%)
500	0.680	180	180	297	57.8

表-3 硬化後の供試体の重量配分 (1m<sup>3</sup>当り)

粘土 (kg)	水和反応後のセメント(kg)	水 (kg)	気泡量(l) 水(kg)
180	225	252	578

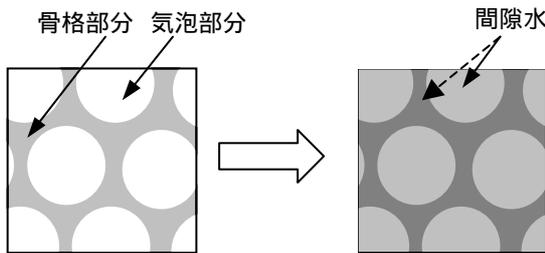


図-5 飽和状態の定義

表-4 要素試験結果

試験方法	供試体状態	背圧 u <sub>b</sub> (kPa)	拘束圧 (kPa)	圧縮強さ (kPa)	飽和度 S <sub>r</sub> <sup>*</sup> (%)
一軸(3本の平均)	不飽和	-	-	414.4	26.9
	飽和	-	-	406.1	102.8
三軸	不飽和 (UU)	0	50	538.9	29.6
		0	100	411.1	29.1
		0	200	468.4	30.2
		0	400	206.3	29.6
	飽和(UU)	200	100	356.0	103.0
		200	200	368.9	103.1
		0	400	456.8	102.3

\*)S<sub>r</sub>は式-1により算定したものの

### 3-2. 飽和供試体の力学的特性の検証

一軸および三軸圧縮試験を実施し、飽和供試体の力学的特性について検証した。その結果を表-4、図-6、図-7に示す。

#### (a) 一軸圧縮試験

一軸圧縮試験では飽和供試体も不飽和供試体も、ほぼ同程度の一軸圧縮強さとなり、飽和による一軸圧縮強さへの影響はないと考えられる。

#### (b) 三軸圧縮試験

不飽和供試体の UU 試験では強度のバラツキが出た。一軸圧縮強さより大きくなるものもあったが拘束圧 400kPa のとき最大軸差応力は、206.3kPa と著しく低下している。

飽和供試体の UU 試験を背圧 200kPa として実施した。この結果を図-6、図-7に示す。拘束圧 100、200kPa とともに同程度の最大軸差応力を得た。これは、拘束圧依存性が小さいという傾向を示している。また、軸圧縮力に伴う間隙水圧は、拘束圧が大きいくほど大きくなる傾向を示している。不飽和供試体と比較して飽和供試体の最大軸差応力が小さいのは図-8に示すように背圧が供試体端面部付近にのみ作用して、実際は、軸圧縮力として作用している可能性がある。

そこで、飽和供試体の UU 試験を背圧のない状態で実施した。拘束圧が 400kPa の UU 試験どうしの比較を行なうと、不飽和供試体にくらべ飽和供試体は、最大軸差応力が 2.2 倍程度となっており、この結果は破壊形式に如実に現れている。図-9のように不飽和供試体は側方拘束によって鉛直方向のみに変形し破壊したのに対し、飽和供試体は、気泡部分の間隙水によって体積変化できなかった結果、局部破壊を起こしたものと考えられる。

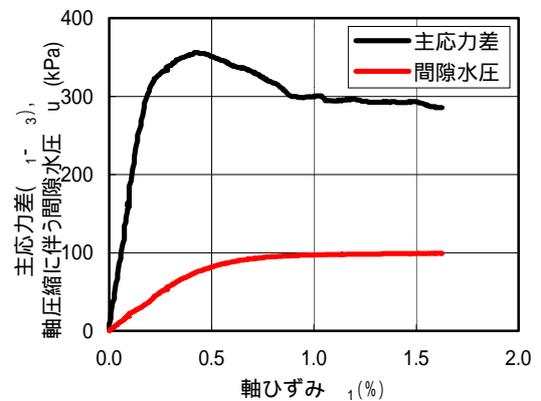


図-6 UU 試験結果 (拘束圧 100kPa)

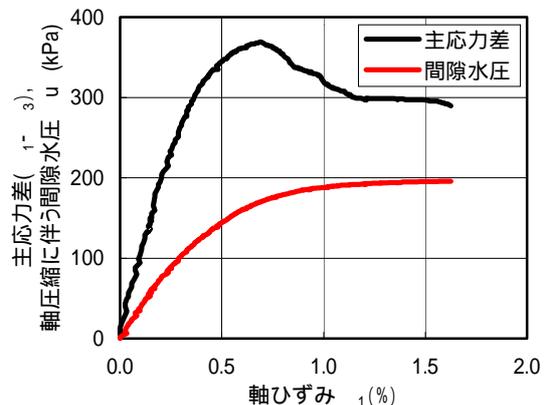


図-7 UU 試験結果 (拘束圧 200kPa)

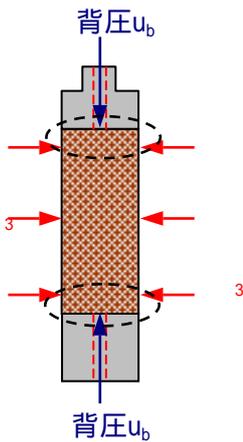


図-8 背圧の作用

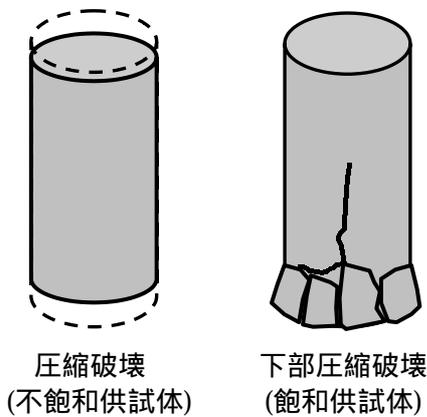


図-9 破壊形式

### 3-3. 飽和供試体の要素試験のまとめ

飽和供試体の要素試験より次のような知見が得られた。

1. 負圧により飽和度を高めた供試体の一軸圧縮強さは、不飽和供試体の一軸圧縮強さとほぼ同様の値となった。
2. 飽和供試体の UU 試験では、拘束圧が圧縮強さに大きな影響を及ぼさない。しかし、拘束圧が大きくなると、軸圧縮に伴う間隙水圧が大きくなる傾向にある。
3. UU 試験において不飽和供試体では、高拘束圧状態になると最大軸差応力は急激に低下するが飽和供試体では水によって応力が分散するため骨格を両側から支圧する形となり、強度の低下はない。

### 4. 噴泥発生メカニズム

載荷板の圧力で盛土表面に浸透した水が気泡の部分を満たして飽和状態になる。圧縮力を受けて発生する間隙水圧によって、図-10のように骨格部分が両

側から支圧された状態できりあう。この状態では盛土の破壊はなく、噴泥を発生することもない。しかし、視点をもう少し下の層に向けてみると、図-11のように飽和していない気泡の層との境目で、間隙水圧が片側だけから作用するため骨格に曲げおよびせん断応力が作用し、骨格が破壊され易い状態になると考えられる。破壊された骨格は細粒化し水と一緒に泥ねい化し、噴泥しやすい状態となり噴泥を発生し排出される。このような破壊が繰り返されることによって、沈下が進行すると考えられる。噴泥発生荷重の載荷開始から噴泥発生までに時間差があったのは、気泡中に水が浸透し飽和度が高くなるまでの時間および破壊された骨格部分が泥ねい化し噴泥を引き起こすまでの時間だったと考えられる。

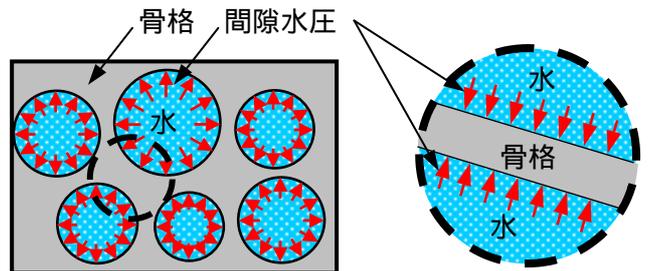


図-10 飽和した層

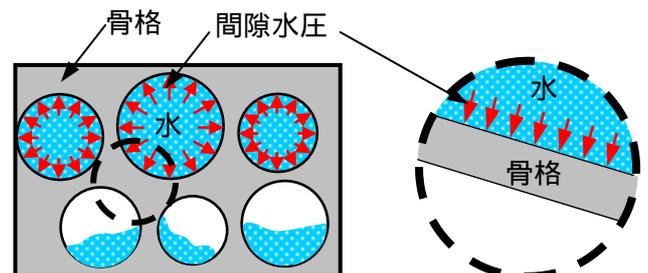


図-11 飽和した層と不飽和の層の境界

### 5. 結論

繰返し試験の結果より得られた関係は、一軸圧縮強さから噴泥発生荷重を予測する場合に利用可能である。また、本試験で行なった飽和供試体および不飽和供試体の要素試験の比較から想定した噴泥発生メカニズムに矛盾がないことを確認できた。

### 4. 今後の課題

セメント添加量が多く気泡含有量の大きい飽和供試体の要素試験の結果は、初めての試みということもあり、極めて少ないデータから得られたものである。したがって、今後のデータの蓄積が必要である。本研究の考察より噴泥時の破壊はミクロな部分のものであると考えられるため、要素試験での明確な検証は困難であると考えられる。そこで、FEM 解析を用いて応力状態を検討することが必要である。