

高い等方圧力を受ける砂の圧縮特性について*

COMPRESSIBILITY OF SAND UNDER HIGH ISOTROPIC
PRESSURES

三浦 哲彦**・山内 豊聡***

By Norihiko Miura and Toyotoshi Yamanouchi

1. ま え が き

高い圧力のもとで、砂が高圧縮性を示すことは、Terzaghi と Peck の著書¹⁾によって古くから知られている。少し遅れて、Roberts と de Souza²⁾も、ある圧力範囲における砂の圧縮性は、粘土のそれに劣らないと指摘している。しかし、高い圧力のもとでの砂の圧縮性が、土木工学上の問題に、直接関連づけて検討されるようになったのは比較的新しい。杭の支持力に関連した de Beer の研究³⁾、Lee と Farhoomand のダム基底材料の圧縮と破砕に関する研究⁴⁾などがそれである。一方、フィルダム材料のせん断特性などに関連して、高圧三軸試験機による土の力学的性質に関する研究も、最近盛んに行なわれるようになり^{5)~11)}、そのいくつかは、やはり砂の圧縮性について検討している。

しかしながら、上述の諸研究においては、砂の圧縮の時間依存性については、あまり検討されていない。筆者らは高圧下における砂の圧縮性を調べていくうちに、ある圧力範囲で、砂の圧縮度と時間の間に一定の規則性があること、さらに高い圧力のもとでは、圧縮はきわめて長時間にわたって続き、しかもその間の圧縮量は予想をはるかに上回るものであることなどの実験結果を得た。このような高圧を受けた砂の圧縮性、特にその時間依存性を検討することは、次のような意味で重要であると思われる。まず直接的には、高圧三軸圧縮試験により砂の性質を調べるための実験上の重要な一指針を与える。すなわち、これまで行なわれてきた圧密排水せん断試験において、圧密（以後圧縮と呼ぶ¹²⁾）時間は各研究者によってまちまちで、しかも 2~4 時間で停止するものが多かった。これは、実験上の時間的制約によることもある

うが、砂の圧縮が時間に依存することがよく知られていなかったためではないかと思われる。本研究の結果から、ある試験目的のためには、長時間の圧縮段階を経たあとせん断段階に入るのが適切であることが認識されよう。次に、フィルダムの沈下が長時間にわたって続くという現象^{12), 13)}を解析するのに役立ち、ひいては、ダムの沈下量あるいは最終沈下量に達する時間を予測するという実際の問題の解決のアプローチともなる。また、地中深部に堆積する砂の間げき比、粒度、粒子形状などから、その砂の先行荷重を推定することも、本研究を進展させることにより可能なることを期待したい。

本文は、高い等方圧力を受ける砂について、その圧縮の時間依存性を実験的に検討したものであるが、同時に、砂の破砕ならびに圧縮特性におよぼす初期間げき比および間げき水の影響についても述べた。また、実験上の一、二の問題点についても検討した。

2. 実験方法

(1) 実験装置

筆者らが、先に行なった研究¹⁴⁾で用いたのと同じ高圧三軸圧縮試験機を使用した。防錆剤を入れた脱気水を圧力媒体として、メンブレンでシールされた供試体を等方的に圧縮した。圧縮圧力は 20 kg/cm² まではハンドポンプにより、20~500 kg/cm² の圧力はエアハイドロポンプにより発生させた。圧力の測定は、最大目盛の異なる 3 個のブルドン管と、ひずみゲージを利用した圧力計によった。供試体圧縮中の静水圧は、圧力室に接続したアキュムレータによって保持され、圧力変動は ±0.3% 以下に抑えた。

(2) 試料ならびに供試体の作製方法

実験に用いた試料は豊浦標準砂であり、その物理的性

* 第 1 回土質工学研究発表会において一部発表 (昭 46.6)

** 正会員 工業技術院九州工業技術試験所資源開発部第 1 課

*** 正会員 工博 九州大学教授 工学部水工土木学科

質は次のとおりである。土粒子比重 $G_s=2.646$ 、均等係数 $U_c=1.5$ 、最大間げき比 $e_{\max}=0.91$ 、最小間げき比 $e_{\min}=0.58$ 。試料の粒度分布は、表-2（後出）に示す。次に、供試体寸法は、直径約 50 mm、高さ約 125 mm である。厚さ約 1 mm のメンブレン（あめゴム製）に、次の要領で試料を入れ、供試体を作製した。密づめ供試体（初期間げき比 $e_0=0.60\sim 0.62$ 、相対密度 $D_r=0.94\sim 0.88$ ）は、乾燥試料を 16 層にわけて、ゴムチップをつけたタンパーで各層 30 回ずつ軽く突固めた。飽和供試体を作製するためには、上部ペDESTALから真空吸引して試料内部の空気を十分に除いたあと、下部ペDESTALを通して脱気水を供給した。乾燥供試体は真空吸引によって締められたのち、いったん大気圧に解放してから、飽和供試体と同様に自立させるため 0.04 kg/cm^2 の負圧をかけた。次に、ゆるづめ供試体 ($e_0=0.82\sim 0.84$ 、 $D_r=0.27\sim 0.21$) は、飽和供試体では、メンブレン内に脱気水を満たし水浸試料を静かに注ぎこんだ。乾燥供試体は、底部に網を張った漏斗を通して試料を静かに落とした。供試体自立のため、密づめ供試体と同じ負圧をかけた。なお、乾燥試料は 80°C で 24 時間炉乾燥したのち、デシケータに保存したものをを用いた。

(3) 試験方法

静水圧を増加しはじめて所定圧力に達するまでに、圧力に応じて 0.5~1.5 分間の時間を要した。供試体の圧縮量は次の方法で測定した。飽和供試体については、供試体に接続したビューレットに排出される水量が圧縮量を示すものと考え、ビューレットおよびそれに接続した電気検出器をとおして記録紙上でそれぞれ読みとった。乾燥供試体については、Bishop ら¹⁴⁾の方法にしたがい、飽和供試体の場合と同様ビューレットおよび記録紙上で読みとった。上述の方法で測定したビューレットの読みは、必ずしも供試体の圧縮量を正しく示すものではない。この点については、次章で少しくわしく検討する。

本実験で対象とした 500 kg/cm^2 までの等方的圧縮圧力の範囲では、乾燥供試体の圧縮は数時間以内に終了する。しかし、高い圧力を受けた飽和供試体の圧縮は、数百時間を過ぎててもなお進行する。この間、圧力媒体として用いた脱気水がメンブレンなどを通して供試体内へ漏れていないことは、乾燥供試体を長時間圧縮して試験前後の含水比が同じであったことで確かめている。たとえば、 300 kg/cm^2 で 56 時間圧縮したときの試験前後の含水比は 0.12% と 0.12%、同様に 500 kg/cm^2 で 21 時間圧縮の場合は 0.10% と 0.09% であった。高圧を長時間保持していると、計測器類、特に圧力計にトラブルを生じやすくなることから、今回は、570 時間を越える実験は行っていない。圧縮を終えた供試体は、緩や

かに圧力を低下させ、圧力解放による供試体の体積膨張が止まるのを待った。試験後の寸法を測ったのち、試料の含水比および粒度を調べた。なお、粒度試験は、次に述べるような統一した方法で実施し、きわめて再現性の高い結果を得た。1) 試料重量が $100\sim 105 \text{ g}$ になるよう厳密な四分法によって取り出す、2) ふるい分けは、ロータップフルイ振とう機を使用し、ふるい分け時間は 10 分間とする、3) ふるいの目づまりをできるだけ少なくする。

3. 圧縮量測定上の問題点

前章で述べた方法で供試体の圧縮量を測定しようとするとき、測定値は主として次の誤差を含んでいると考えねばならない。a) 供試体表面の粒子間げきへのメンブレンの食い込み（以下簡単に、メンブレンの食い込みと呼ぶ）、b) 長時間測定の場合、蒸発によるビューレット水位面の低下。

(1) メンブレンの食い込み量

高圧三軸試験におけるメンブレンの食い込み量を、従来の方法^{15), 16)}で求めるのにはいくつかの難点がある。そこで、等大球を試料とした場合のメンブレン食い込み量を推定する式を導き、次に実測値をもとにメンブレン食い込み量を算出して、両者を比較検討した。

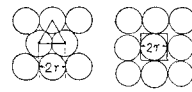


図-1 供試体表面の球粒子配列

まず、次の仮定をする。a) 等大球粒子の供試体を圧縮したとき、メンブレンに接する粒子は、同一面上に、図-1 A, B またはその中間的配列をとる（平均粒径 1.8 mm のスチールボールを密につめて圧力 20 kg/cm^2 で圧縮したところ、粒子配列は A に近いものであった）。b) メンブレンの食い込み深さは粒子直径を越えない。

図-1 A 配列の場合を、粒子がメンブレンに接する供試体側面について考える。図を参考にして、空げきの数は $N_e = (2\pi RH)/\sqrt{3}r^2$ (個)、1 個の空げきの体積は $v_e = 2\sqrt{3}r^3 - 2\pi r^3/3$ (cm^3) となる。A 配列の場合のメンブレンの食い込みみる体積は $V_A = N_e \cdot v_e$ で求まるが、その量は圧縮圧力によって変わるから係数 f_A をとり入れて、結局次の式を得る。

$$V_A = 4.98 f_A \cdot r \cdot R \cdot H \text{ (cm}^3\text{)} \dots\dots\dots (1)$$

同様に B 配列については、

$$V_B = 5.98 f_B \cdot r \cdot R \cdot H \text{ (cm}^3\text{)} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 R および H は、圧縮後の供試体半径および高さ、 r は球粒子半径を表わす。また、 f_A および f_B は 0 と 1 の間の数である。

次に、実測値をもとにメンブレンの食い込み量を求め

ると次のようである。ただし、等方圧縮圧力 p によって生じる体積ひずみは、測定される軸ひずみ ϵ_c の3倍で与えられ、また、ビューレットへの排水量は供試体圧縮量にメンブレンの食い込み量が加わったものと考えられる。よって、排水量に基づいて求めた見かけの体積ひずみ ϵ_{vA} から $3\epsilon_c$ を差し引くと、メンブレンの食い込みによって生じた過大な体積ひずみ ϵ_{vm} が求まる。メンブレンの食い込み量は、供試体初期体積を V_0 として、 $\epsilon_{vm} \cdot V_0$ で与えられる。

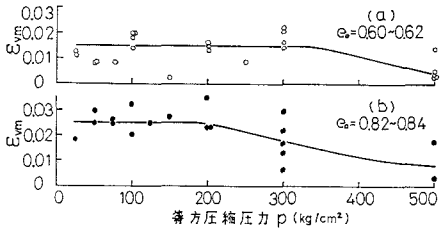


図-2 圧力とメンブレン食い込み量の関係

ϵ_{vm} と p の関係を 図-2 に示す。かなりのばらつきはあるが、ある圧力範囲では、 ϵ_{vm} はほぼ一定の値をとるようである。これは、メンブレンに接する粒子面の配列が 25 kg/cm^2 以下の圧力で決まり、かなり高い圧力に至るまでその状態が保たれていることを示す。圧力がさらに高くなると、粒子間距離の接近および破砕による表面粒子径の減少により、メンブレンの食い込み量はかえって減少していくものと考えられる。

先に求めた式 (1), (2) を実験結果に適用してみる。図-2 で ϵ_{vm} が一定値をとる圧力範囲では、係数 f_A, f_B はともに 1.0 と考えてよい。 r として試料の平均粒径 ($D_{50} \approx 0.02 \text{ cm}$) の $1/2$ を用い、密づめ供試体の $p=200 \text{ kg/cm}^2$ の場合に式 (1) を用いると、 $V_A=1.5 \text{ cm}^3$ ($D=4.90 \text{ cm}, H=12.1 \text{ cm}$)。式 (2) では $V_B=1.8 \text{ cm}^3$ 。一方、図-2 (a) において $\epsilon_{vm}=0.015$ であるから $\epsilon_{vm} \cdot V_0=3.6 \text{ cm}^3$ ($V_0=239.6 \text{ cm}^3$)。同様にして、 $p=200 \text{ kg/cm}^2$ のゆるづめ供試体については、 $\epsilon_{vm} \cdot V_0=5.9 \text{ cm}^3$ 。このように、実測値に基づく値と式 (1), (2) で求めた値との間にはかなりの開きがある。これは、前者には圧縮ひずみが等方的であるという仮定および測定上の誤差が含まれ、後者は粒子形状を考慮していないことなどで実際より小さめの値を与えているためと考えられる。メンブレン内壁と、それより1粒子径だけ内側の面とで囲まれる空間の体積 ($2r \times 2\pi RH$) が 3.8 cm^3 であることを考えると、真のメンブレン食い込み量は、二つの方法で求めた値の中間の値をとるのではないかと思われるが明確でない。このことから、本文では検討した結果を示すにとどめ、以下のデータではメンブレンの食い込み量は考慮されていない。

(2) ビューレット上端からの蒸発量

飽和供試体の体積圧縮量を、上端の開いたビューレットを用いて長時間測定する場合は、蒸発による水量の減少を無視できない。従来このような場合には、ビューレット水面に油を滴下することが行なわれている。しかし、この方法は油滴下のあと水位が変動すると、壁面に油が付着して油被膜は失われ、蒸発防止効果は著しく低下する。さらには、油で汚れた部分を実験のつどきれ

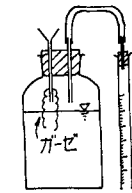


図-3 蒸発防止法

いにする必要がある。筆者らは 図-3 に示すような簡単な方法によって、蒸発量をほとんど0にすることができた。上述のことを検討するために行なった実験の結果は次のとおりである。内径 1.0 cm のビューレットに上端から 20 cm のところまで水を入れ、平均温度 27°C ($\pm 2^\circ\text{C}$)、平均相対湿度 70% ($\pm 20\%$) の部屋に 30 日間放置した。この間の平均蒸発量は、(1) 蒸発を防止しない場合 $0.072 \text{ cm}^3/\text{day}$ 、(2) 油を2滴落したのち 5 cm だけ水面を移動した場合 $0.032 \text{ cm}^3/\text{day}$ 、(3) 図-3 の方法による場合 $0.002 \text{ cm}^3/\text{day}$ であった。本文のデータはすべてこの方法によるものであり、蒸発による水位変化量は無視しうる。

乾燥供試体の場合は、閉じたビューレットを用いるので、蒸発による水位変化はあまり問題にならない。

4. 実験結果

高い圧力を受けた砂の圧縮現象はかなり複雑で、低圧におけるそれとはまったく趣を異にする。最も顕著な相違点は、高圧下においては圧縮が非常に長時間にわたって続くことである。これは圧縮過程が、粒子破砕および粒子間すべり現象の複雑なからみ合いであることを示唆している。また、高圧下の砂の圧縮現象は、圧力付加条件、試料の物理的性質のみならず、間げき水の存在の有無によっても大きな影響を受ける。以下に砂の圧縮の時間依存性について検討するが、圧縮特性におよぼす諸要因のうち、ここで考慮されているのは、等方圧縮圧力の大きさ、初期間げき比ならびに間げき水の存在の影響、などである。

(1) 等方圧縮圧力の大きさが、圧縮の時間依存性におよぼす影響

圧力範囲 $0 \sim 175 \text{ kg/cm}^2$ における飽和供試体について、ビューレットへの排水量の時間変化が0になったときを圧縮度 100% として、圧縮度 U と時間 t の関係を求めると 図-4 のようになる。曲線の変化をくわしく見

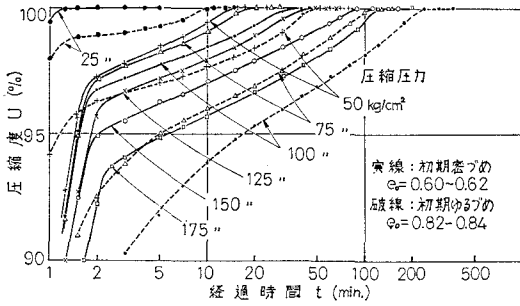


図-4 飽和供試体の圧縮度と経過時間の関係

るために、図は $U \geq 90\%$ の範囲だけを示している。初期間げき比 e_0 が同じ場合の $U-t$ 曲線群は、きわめて類似したパターンを示している。すなわち、曲線は、二つの大きな変曲点と、それらをつなぐ直線に近い曲線からなっている。一つの変曲点は、圧力付加後数分の間に現われ（第1変曲点と呼ぶ）、他の一つは圧縮が終了する直前に見られる（第2変曲点と呼ぶ）。第2変曲点に達する前に曲線の勾配が急になることも、全曲線に共通した特徴である。さらに、圧力 p が大きくなるに伴って曲線は右方へずれてゆくが、直線部分の勾配はあまり変化しない。もう一つの注目すべきことは、二つの変曲点間の直線部分を延長すると、その直線の $U=100\%$ 軸上の点は、当該曲線の $U=100\%$ ときの t 点 ($t_{U=100}$) にきわめて近いという事実である。これらの実験事実に基づいて、実験試料については、圧縮度、圧力および時間の間に次のような関係を求めることができる。二つの変曲点間の直線は、

$$U_{100} - U_{t_x} = a \log_{10}(t_{U=100}/t_x) \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $U_{100}=100(\%)$ 、 U_{t_x} は $t=t_x(\text{min})$ のときの圧縮度 ($\%$)、 a は直線の勾配を示す。 a および U_{t_x} は、 p の関数として実験的に求められようが、本実験試料については、表-1 および 図-5 に示すような結果が得られた。これから、示された変域の任意の p に対して、実験試料の圧縮度が 100% に達するに要するおおよその時間 $t_{U=100}$ を推定することができる。たとえば $p=120 \text{ kg/cm}^2$ のとき、密づめ砂の $t_{U=100}$ は、 $t_x=5$ として $\log(t_{U=100}/5) = (100-97.2)/2.58$ となり、 100% の圧縮に約 60 分を要することがわかる。

さらに高い圧力のもとでは、砂の圧縮はきわめて長い

表-1 a の値 (飽和供試体)

初期密度 条件	等方圧縮圧力 (kg/cm ²)						
	25	50	75	100	125	150	175
密づめ $e_0=0.60\sim 0.62$	—	2.78	2.80	2.60	2.57	2.79	3.15
ゆるづめ $e_0=0.82\sim 0.84$	1.48	2.65	3.19	4.08	—	—	—

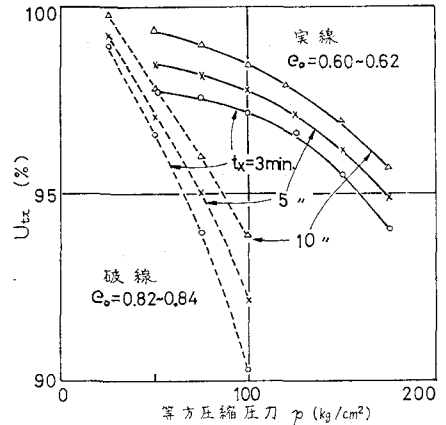


図-5 飽和供試体における $p-U_{t_x}$ の関係

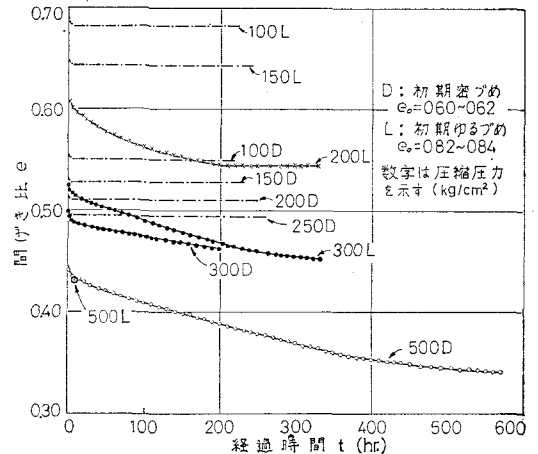


図-6 飽和供試体の $e-t$ 曲線

時間続く。図-6 は、これまでに行なった飽和供試体についての長時間圧縮試験の結果を示すものである。300 kg/cm² 以上の圧力を加えた場合のデータは、途中で実験を停止したので完結していない。Maxwell¹⁷⁾ の示したデータ (砂を、圧力 2000 kg/cm²、温度 230~300°C の条件で 100 日間圧縮) を参考にして推測すると、本実験の $e-t$ 曲線は、なお数百時間にわたってゆるやかな変化を続けるものと思われる。このような不明な部分があるにしても、図-6 から次のことを読みとることができよう。まず、それを越えると $t_{U=100}$ が非常に長くなる圧力 P_{ct} が存在する。初期密づめおよびゆるづめ供試体の P_{ct} は、それぞれ 250~300 kg/cm² および 150~200 kg/cm² の間にある。次に、 P_{ct} より大きな圧力のもとで、実験試料の圧縮は数百時間にわたって続き、その圧縮量はかなり大きい。いま、初期間げき比を e_0 、10 時間圧縮後のそれを e_{10} 、実験で得た最終間げき比を e_{ft} として、3つの間げき比の関係を次のように表わすことにする。

$$\frac{e_{10} - e_{ft}}{e_0 - e_{10}} = C \dots\dots\dots (4)$$

図-6 において、200 L, 300 D, 300 L および 500 D の C 値は、それぞれ 0.22, 0.22, 0.19 および 0.52 である。最終圧縮量に達している 200 L の場合を除き、その圧力に対応する最終間げき比 e_f は、明らかに e_{ft} より小さいはずである。 e_{ft} の代りに e_f を用いれば、そのときの C 値と圧力 p との間には、 p が大きくなるに伴って C 値も大きくなるような一定の関係のあることが予測される。これらのことから、次のことが指摘できる。砂の P_{ct} を越える高い拘束圧のもとで排水せん断特性を調べようとするとき、せん断前の圧縮時間を 10 時間程度に抑えたと誤った強度特性を得る恐れがある。なぜなら、自然状態での砂の間げき比は、 e_f または近似的に e_{ft} に対応すると考えられるが、これらは e_{10} に比べてかなり小さく、このようなせん断前の間げき比の大きな開きが強度特性に影響をおよぼさないと考え難いからである。

上の議論で e_{10} を基準にして考えたのは、これまで行なわれてきた砂の高拘束圧下のせん断特性に関する研究において、圧縮段階は数時間で停止することが、一般に行なわれているからである^{5), 6), 10), 11)}。

(2) 初期間げき比の影響

砂が大きな等方圧縮圧力を受けて最終の状態(間げき比)に達したとき、初期間げき比 e_0 の大きなものは、小さい e_0 から出発したものに比べて高位の構造を有している。このことを述べた先の研究¹¹⁾においてまだ検討していなかった圧縮過程におよぼす初期間げき比の影響について述べる。

初期間げき比の大きさが、砂の圧縮度と経過時間の関係に大きな影響をおよぼすことは、図-4 を見れば明らかである。初期密づめ供試体においては、第1変曲点の曲りはきわめて鋭く、しかもそれが現われる時間は、圧力の大きさの影響をあまり受けていない。一方、初期ゆるづめ供試体は変曲点の曲りが緩やかで、その位置は圧力の増大に伴って右方へずれる傾向がある。初期間げき比の影響が最も顕著に現われるのは、第1変曲点を過ぎたある時間における圧縮度 U_{tx} においてである(図-5)。 $U_{tx} \sim p$ 曲線は、 t_x を大きくすると上方に移動するが、250 kg/cm² 以下の圧力範囲において、初期ゆるづめの供試体の曲線は常に初期密づめ供試体のそれより下にある。

次に、高い圧力域における飽和供試体の $e \sim t$ 曲線を示す 図-6 において、200 D と 200 L の間げき比の差は、経過時間とともに縮まり、300 D と 300 L の長時間後の間げき比は一致する傾向にある。さらに高い圧力

(500 kg/cm²) のもとでは、比較的短時間のうちに同じ間げき比に達する。しかしこのときの粒度は同じではなく、初期ゆるづめ供試体の粒度は、初期密づめ供試体のそれより細かいものになっている¹¹⁾。

(3) 間げき水の存在が圧縮特性に及ぼす影響

間げき水の存在が砂の圧縮特性にどのような影響を及ぼしているかを検討するため、乾燥試料についての圧縮試験をいくつか行なった。図-7 はそれらの結果を示す $e \sim t$ 曲線である。間げき水が存在する場合(図-6)と

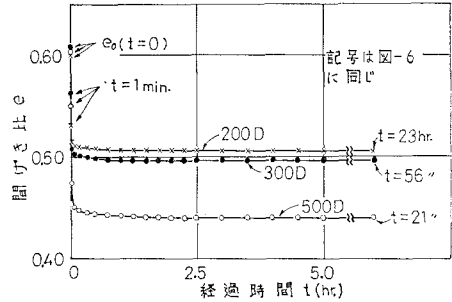


図-7 乾燥供試体の $e \sim t$ 曲線

比較して間げき水の存在は、砂の圧縮特性に次のような影響を及ぼしていることがわかる。まず、200 kg/cm² の圧力を受ける初期密づめ供試体については、最終間げき比 e_f に達する時間はともに 2 時間程度で、しかも両者の e_f 値は近い値を示している。乾燥供試体の方がいくぶん早く e_f に近づくようであるが、間げき水の影響は明らかでない。次に、圧縮圧力が 300 kg/cm² を越えると間げき水は砂の圧縮特性に顕著な影響を及ぼす。すなわち、乾燥供試体は、圧力を加えて 2~3 時間後に最終間げき比に達するが、飽和供試体においては、先に式(4)の C 値でも示したように、10 時間を過ぎたあとの間げき比減少 ($e_{10} - e_f$) は、それまでの減少量 ($e_0 - e_{10}$) の数 10% にも及ぶ。また、乾燥供試体の最終間げき比が、数時間圧縮したときの飽和供試体の間げき比にほぼ近いことも注目される。

5. 考 察

前章で述べた実験結果について考察するのに、試料の粒度変化を調べることは、きわめて有効であると思われる。そこで、2.(3) で述べた方法によって各試験試料についての粒度試験を行ない、表-2 の結果を得た。これらのデータを参考にして、砂の圧縮現象についての考察を行なう。

表-2 試験試料の粒度分布

試験条件					各ふるい加積通過率(%)						
試験番号	圧縮圧力(kg/cm ²)	初期密度条件	湿条	潤滑条件	圧力付加時間	250 μ	210 μ	177 μ	149 μ	105 μ	74 μ
原 試 料					92.0	84.9	18.9	3.4	0.4	0.1	
97	500	密づめ D	飽和 s		570 hr	94.0	89.3	45.6	27.0	17.6	11.7
31	"	D	s		7 "	93.5	87.8	40.9	22.1	13.7	8.8
30	"	ゆるづめ L	s		16 "	94.7	90.4	49.7	30.5	20.1	13.5
99	"	D	乾燥 d		20 "	92.2	86.1	33.3	15.6	8.9	5.4
94	300	D	s		205 "	92.9	86.9	31.1	11.6	5.6	3.1
32	"	D	s		9 "	92.8	87.3	29.7	12.3	6.3	3.6
107	"	D	s		5 min	91.9	84.6	23.9	7.8	3.4	1.8
95	"	L	s		330 hr	94.0	89.1	43.8	24.3	14.6	9.1
102	"	L	s		45 "	94.2	88.4	42.9	24.3	14.9	9.4
108	"	L	s		5 min	93.7	88.4	35.6	16.7	8.9	5.2
98	"	D	d		56 hr	92.2	84.2	27.7	8.3	3.5	1.8
33	200	D	s		7 "	92.3	85.7	25.5	6.9	2.5	1.2
106	"	D	s		3 min	91.6	84.6	21.6	5.2	1.5	0.7
104	"	L	s		327 hr	94.5	89.5	39.0	20.5	11.6	6.9
109	"	L	s		3 min	93.4	88.0	29.0	11.3	5.3	2.9
100	"	D	d		23 hr	91.6	84.6	23.2	5.1	1.5	0.7
34	100	D	s		9 "	91.8	85.0	21.6	3.9	0.7	0.3
105	"	D	s		2 min	91.9	85.6	22.1	3.8	0.6	0.2
101	"	L	s		5 hr	91.3	84.2	22.8	6.2	2.1	1.0

ふるい分け条件:ロータップふるい振とう機使用, 10分間

(1) 圧縮度と時間の関係について

図-4 に示した $U-t$ 曲線において, 初期密づめ供試体の第1変曲点は, それに至る数分の間に圧縮全過程で生じる粒子破碎のうちの大部分が終わったことを示すものである。表-2 に示された 100 kg/cm² の圧力で2分間圧縮した No. 34 と, 9時間圧縮のNo. 105 (以下, No. つきの数字は, すべて表-2 の試験番号を示すものとする) の粒度分布の間に, 有意差が認められないことから前述のことがわかる。圧力 200 kg/cm² の No. 33 と No. 106 を比較しても, ほぼ同様ながいえる。したがって, 第1変曲点以降は, それまでに生じた新しい粒度を持つ試料がより安定な粒子配列をとるために, 主として粒子間すべりによって圧縮が進行するといえる。

圧力が高くなるか, もしくは初期間げき比が大きくなるに伴ない, 第1変曲点の曲率は小さくなり, 同時に, それを過ぎてからの粒子破碎量も多くなる傾向にある (No. 32 と No. 107, No. 106 と No. 109, および No. 34 と No. 101 の比較)。圧縮圧力が大きくなること, ならびに間げき比が大きくなることは, ともに個々の粒子間接触圧力が増すことを意味する。そこで, 先述の現象は次のように説明できると考える。すなわち, 第1変曲点は一次的破碎を終え, 粒子間接触圧力 p_c と粒子破碎強度 σ_B の関係が一応平衡状態に達したことを示す。続いて, 粒子間すべりを主体とする圧縮過程へ移るが, このとき, p_c が σ_B に近い値であれば, すべりの進行に伴って, 局所的な $p_c > \sigma_B$ の状態が多数出現する

であろう。先に述べた第1変曲点の曲りが鋭い場合は, 第1変曲点を過ぎたあと $p_c > \sigma_B$ なる微視的応力状態の出現する数がきわめて少ないと考えることができよう。上述のことから, 第1変曲点に至るまでを一次圧縮過程, それに続く主として粒子間すべりによって進行する過程を二次圧縮過程と呼ぶことにする。

一次圧縮過程を終えたときの試料粒度は, 当然圧力が大きいほど細かくなっている。No. 105, No. 106 および No. 107 の粒度分布を比較すると, 圧力増加に伴う粒度変化がしだいに細粒部分に及んでいく過程が明りょうにわかる。これは, 圧縮過程における粒子破碎が粒子間空けきを埋めるように, 言葉をかえれば, 良い粒度へ移るように行なわれることを示すものである。

次に, 長時間圧縮した場合について述べる。飽和供試体の $e-t$ 曲線 (図-6) を見るとき, 到達した最終間げき比 e_{ft} の大きさは, 決して圧縮過程の粒子破碎量を示すものでないことに注意しなければならない。実験試料についていえば, むしろ初期間げき比からの減少量 ($e_0 - e_{ft}$) と粒子破碎量 (粒度変化) の間に, 良い対応が見られる。図-6 で, ($e_0 - e_{ft}$) がほぼ同じ値を示すのは, 表-2 のうち, No. 97 と No. 104 および No. 107 と No. 101 の組である。各組の試料粒度は, それぞれ近い分布を有している。また, 同じ間げき比を示す二つの試料を比較するとき, No. 31 と No. 30, No. 94 と No. 95, および No. 34 と No. 104 の間に見られるように, ($e_0 - e_{ft}$) の大きい方が, 明らかにより多くの粒子破碎を受けている。

(2) 砂の圧縮特性に及ぼす間げき水の影響

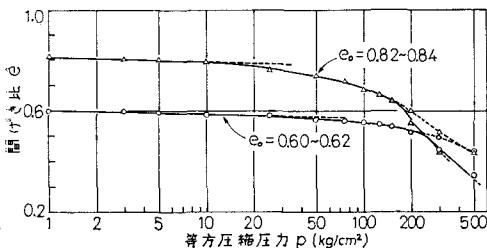
前節で述べた ($e_0 - e_{f1}$) と粒度変化との関係は、間げき水の有無にかかわらず成りたつようである。たとえば、($e_0 - e_{f1}$) がほぼ一致する No. 33 と No. 100, および No. 107 と No. 98 の各組の粒度分布は類似している。

図—6 および 7 に示される $e-t$ 曲線を比較すると、初期密づめ供試体に 200 kg/cm^2 の圧力を加えた場合 ($200 D$) は、間げき水の存在の影響は無視することができる。しかし、 $300 D$ および $500 D$ の場合は、きわめて明らかに間げき水の影響が現われている。このように、高い圧力のもとで間げき水の影響を受けて進行する圧縮過程は、先に述べた二つの圧縮過程と区別することができるので、これを三次圧縮過程と呼ぶことにする。

三次圧縮過程における粒度変化について検討すると、次のことがわかる。圧力が 300 kg/cm^2 の場合は、初期間げき比の大小にかかわらず粒度変化は認められない (No. 94 と No. 32, No. 95 と No. 102)。圧力が 500 kg/cm^2 になると、三次圧縮過程での粒度変化が見られる (No. 97 と No. 31)。水が三次圧縮過程にどのような機構で寄与しているのかは明らかでないが、その一つとして考えられるのは粒子間接触部におけるシリカの溶解である。一般にシリカは、高温高圧のもとでは水にかなり溶解する¹⁶⁾。Maxwell¹⁷⁾は、砂の岩石化に関連してシリカの溶解・再析出を検討し、低温におけるシリカの水に対する溶解量は問題にならず岩石化には何ら寄与しないと結論している。しかしながら、粒子間摩擦抵抗を減少せしめるという観点からは、たとえその溶解量はきわめて微量であってもその効果は顕著であると考えられる。三次圧縮過程に及ぼすシリカの溶解の影響は、今後の検討にまたねばならない。

(3) 等方圧縮圧力と間げき比の関係

等方圧縮圧力 p の増大に伴う間げき比 e の変化は、図—8 に示すとおりであった。 $e \sim \log p$ の関係は次のような特徴を有している。ある圧力範囲 (密づめ: $p < 25 \text{ kg/cm}^2$, ゆるづめ: $p < 10 \text{ kg/cm}^2$) において直線的



図—8 $e \sim \log p$ 曲線

変化をみせ、その間初期間げき比の異なる二つの直線は平行である。初期ゆるづめ供試体の $e \sim \log p$ 曲線に見られるように、数 10 kg/cm^2 の高い圧力を受けても、間げき比の減少はきわめて少ない。しかしながら、静的圧力のもとで安定であれば動的外力に対しても安定である、という保証はまったくない。粒子間に作用している静止摩擦は、地震などの動的外力によって容易に運動摩擦に変化し、間げき比の瞬間的減少を生起する恐れが強い。上述のことから、フィルダムを築造するとき、次の点に留意しなければならないことがわかる。ダム底部の材料は、 10 数 $\text{kg/cm}^2 \sim$ 数 10 kg/cm^2 の上載荷重を受けるにもかかわらず、自重による締固め効果はあまり期待できない。したがって、地震に対する安全性を高めるには、底部の材料ほど施工段階における締固めを十分行うことが重要である。

次に、図—8 の高い圧力範囲に示された破線は、二次圧縮過程が終了したときの間げき比を表わしている。図—7 に示されたデータを 図—8 上にプロットすると、上述の破線とまったく一致する。一方、実線は三次圧縮によって得られた間げき比と圧縮圧力の関係を表わすものである。図—6 に見られるように、 $200 L$ を除いて、まだ最終間げき比に達していないので、最終的には曲線勾配はさらに急になる。高い圧力範囲について、圧縮指数 C_c を求めると、二次圧縮に対して $C_c = 0.25$ 、三次圧縮に対しては $C_c = 0.52$ という非常に高い値が得られる。

6. ま と め

以上の実験結果およびその考察から、高い等方圧力を受ける標準砂のような砂の圧縮特性について、次のような新しい知見を得た。

(1) 高圧三軸圧縮試験機を用いて砂の圧縮試験を行なう際の、測定上の問題点について検討した。そして、ビューレットからの水の蒸発を防ぐための簡単にして確実な方法を示した。メンブレンの粒子間げきへの食い込み量は、ある圧力範囲では一定であること、また、高い圧力範囲においては、圧力上昇に伴ってメンブレンの食い込み量は減少することを定性的に示した。しかし、その絶対量を求める方法は、今後の検討にまたねばならない。

(2) ある圧力範囲において、圧縮度 U と経過時間の対数 $\log_{10} t$ との関係曲線は、特異なパターンを示す。すなわち、二つの変曲点と、それらを結ぶ直線に近い曲線からなる。 $U \sim \log_{10} t$ 曲線は、圧縮圧力ならびに初期間げき比の変化に伴ない、一定の変化を示す。そこで、圧縮度、圧力、初期間げき比および経過時間の関係

を式(3)で表わし、変数のいくつかを実験的に求めておけば、圧縮度100%に達するに要するおよその時間を推定できる。

(3) 上述の変曲点のうち第1変曲点は、それに至る数分の間に、圧縮全過程において生じる粒子破碎の大部分が終わったことを示すものである。それに続く圧縮は、主として粒子間すべりによって進行し、前述の圧縮過程と区別することができる。前者を一次圧縮過程、後者を二次圧縮過程と呼ぶ。

(4) さらに高い圧力範囲において、飽和供試体のみが長時間にわたる圧縮を続ける。この過程は、間げき水が存在することによってのみ生じるので、一次および二次圧縮過程と区別し、三次圧縮過程と呼ぶ。すなわち、乾燥供試体は、二次圧縮過程の終了とともに圧縮の進行は停止する。

(5) 二次圧縮過程までの間げき比の減少に対する、三次圧縮過程での間げき比減少の割合を式(4)のように表わすと、その値は0.2以上となる。圧縮圧力の増大に伴ってその値も大きくなる傾向を有する。したがって、三次圧縮過程を生じるような圧力条件のもとで砂の三軸圧縮試験を行なう際は、試験目的に応じて、せん断前の圧縮時間を慎重に選ぶことが重要である。

(6) 圧縮による試料の粒度変化は、圧力増加に伴って次第に細粒部分に及んでゆく。すなわち、圧縮過程における粒子破碎は、良い粒度が実現する方向に進んでゆく。

(7) 圧縮による試料の粒子破碎量は、最終間げき比には関係なく、初期間げき比と最終間げき比の差($e_0 - e_f$)と密接な関係がある。

(8) 圧縮圧力 $\log p$ と間げき比 e の関係は、圧力が数 10 kg/cm^2 に達するまでは直線的に変化し、その勾配はきわめて緩やかである。この勾配は、初期間げき比の大小にかかわらずほぼ一定である。

(9) 前述のことは、初期ゆるづめ試料の構造の高位性が、高い圧力に至るまで保持されることを意味する。しかし、この高位の構造は、地震などの動的外力によって瞬間的に失われる恐れが強い。これらのことから、フィルダムの築造において次の点に留意しなければならないことがわかる。まず、底部の材料といえども、上載材料の重量による締固め効果は多くを期待できない。したがって、地震動に対しても安定であるためには、施工段階で十分に締固めておく必要がある。

(10) 高い圧力範囲において、実験に用いた砂の圧縮指数 C_c は、二次圧縮過程に対して $C_c = 0.25$ 、三次圧縮過程に対しては $C_c = 0.52$ という非常に高い値が得られた。

最後に、本実験データの一部を討議していただいた、

九州工業技術試験所資源開発部第1課長 松田応作氏ならびに同1課研究員諸氏に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Terzaghi, K. and Peck, R.B.: Soil Mechanics in Engineering Practice, John Wiley and Sons, New York, 1948.
- 2) Roberts, J.E. and de Souza, J.M.: The Compressibility of Sand, Proc. ASTM, Vol. 58, 1958.
- 3) de Beer, E.E.: The Scale Effect in the Transposition of the Results of Deep Sounding Tests on the Ultimate Bearing Capacity of Piles and Caisson Foundation, Geotechnique, Vol. 13, No. 1, 1963.
- 4) Lee, K.L. and Farhoomand, I.: Compressibility and Crushing of Granular Soil in Anisotropic Triaxial Compression, Canadian Geotechnical Jour., Vol. IV, No. 1, 1967.
- 5) Hall, E.B. and Gordon, B.B.: Triaxial Testing with Large-Scale High Pressure Equipment, Laboratory Shear Testing of Soils, STP No. 361, 1963.
- 6) Hirschfeld, R.C. and Poulos, S.J.: High Pressure Triaxial Test on a Compacted Sand and an Undisturbed Silt, Laboratory Shear Testing of Soils, STP No. 361, ASTM, 1963.
- 7) Insley, A.E. and Hillis, S.F.: Triaxial Shear Characteristics of a Compacted Gracial Till under Unusually High Confining Pressures, Proc. 6th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Vol.1, 1965.
- 8) Bishop, A.W. Webb, D.L. and Skinner, A.E.: Triaxial Tests on Soil at Elevated Cell Pressure, Proc. 6th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Vol. 1, 1965.
- 9) Lee, K.L. and Seed, H.B.: Drained Strength Characteristics of Sands, Proc. ASCE, No. SM 6, 1967.
- 10) Vesić, A.S. and Clough, G.W.: Behaviour of Granular Materials under High Stresses, Proc. ASCE, Vol. 94, No. SM 3, 1968.
- 11) 三浦哲彦・山内豊穂: 高拘束圧下における標準砂の排水せん断特性について, 土木学会論文報告集, No. 193, 1971.
- 12) Høiestøl, K., Kjaerensli, B., and Torblaa, I.: Compression of Tunnel Spoil at Venemo Dam, Proc. 6th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Vol. II, 1965.
- 13) Sowers, G.F., Williams, R.C., and Wallace, T.S.: Compressibility of Broken Rock and Settlement of Rockfills, Proc. 6th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Vol. II, 1965.
- 14) Bishop, A.W., and Henkel, D.J.: The Measurement of Soil Properties in the Triaxial Test, E. Arnold and Sons, London, 1958.
- 15) Newland, P.L. and Allely, B.H.: Volume Changes in Drained Triaxial Tests on Granular Materials, Geotechnique, Vol. 7, 1957.
- 16) Roscoe, K.H., Schofield, A.N. and Thurairajah, A.: An Evaluation of Test Data for Selecting a Yield Criterion for Soils, Laboratory Shear Testing of Soils, STP 361, ASTM, 1963.
- 17) Maxwell, J.C.: Experiments on Compaction and Cementation of Sand, Geo. Soc. Ame., Memoir 79, Rock Deformation, 1960.
- 18) 光田 武: CaO-SiO₂-H₂O 系鉱物の合成と生成条件, 鉱物学雑誌, Vol. 10, No. 2, 1970.

(1971.11.29・受付)