

粗粒材料の力学的特性に関する基礎的実験

森 満雄*・阿部道雄**

1. まえがき
2. 実験概要
3. 実験結果および考察
 - 3.1 締固め方法の相異と圧縮強度・締固め密度の関係
 - 3.2 締固めエネルギー・密度と粘着力・せん断抵抗角の関係
 - 3.3 原材料と破碎された材料の比較
 - 3.4 締固め層数と圧縮強度・密度の関係
 - 3.5 締固めおよび圧縮による粒子の破碎
4. むすび

1. まえがき

従来、アースダムなど粗粒材料を用いた構造物は、多分に、経験的な手法を用いて設計されてきたが、大型力学試験による粗粒材料の試験が可能となるに従って、その力学的性質の解明と理論的裏付けが期待されるようになった。

この報告は、大型三軸圧縮試験機による粗粒材料の力学試験についての基礎的実験で、締固め方法・締固めエネルギーの相異によって、締固め密度・圧縮強度・破碎量が、どのように変化するかを検討したものである。

とくに、供試体の各層に加える締固めエネルギーを変化させた場合、全締固めエネルギーが同一であっても、締固め密度・圧縮強度の異なることを明らかにした。

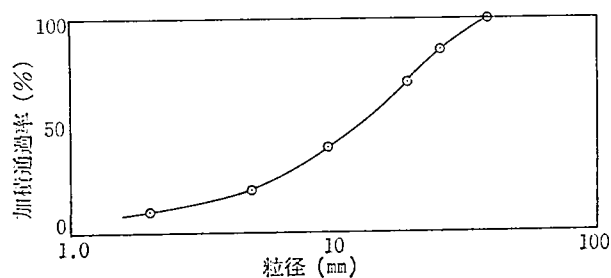


図 1 使用粒度分布曲線

* 理工学部土木工学科教授 土質工学 道路工学

** 理工学部土木工学科助手 土質工学

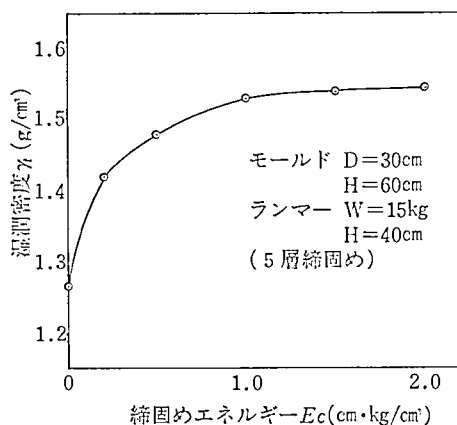


図 2 締固めエネルギーと密度の変化

2. 実験概要

実験に使用した粗粒材料は碎石で、図 1 に示す粒度分布に配合し、締固めて三軸圧縮試験を行なった。

碎石は、ややもろい砂岩系の岩質で、見掛比重 2.637、かさ比重 1.868、表乾比重 2.159、吸水量 15.6% であり、実験は気乾含水比 ($w=5.3\%$) の状態で用いた。供試体（直径 30 cm、高さ 60 cm）の作製は、大型突固め試験機（ランマー重量 15 kg、端面直径 15 cm、落下高 40 cm）を用い、5 層・3 層および 2 層で締固めた場合について三軸圧縮試験を実施した。締固めにあたっては、各層ごとに粒度調整して締固め、その必要量は予備実験により推定した。

大型三軸圧縮試験の方法は UU 試験とし、側圧は 2.0 kg/cm^2 、 6.0 kg/cm^2 とした。

図 2 は大型突固め試験による締固めエネルギーと湿潤密度の関係である。本実験に使用した材料は一般の碎石にくらべて吸水量も大きく、従って、締固め密度も低い。1.0 Ec より締固めエネルギーを増しても密度の増加は少なく 2.0 Ec でほぼ一定となる。ここに、1.0 Ec とは、JIS A 1210 による第 1 方法と等しいエネルギーの場合を示す。この密度は 5 層構成の各層ごとに同一の締固めエネルギー（同一突固め回数）を加えて得られたもの

表 1 各層の締固めエネルギー一覧表

層順	0.2 Ec ($\text{cm} \cdot \text{kg/cm}^2$)					0.5 Ec ($\text{cm} \cdot \text{kg/cm}^2$)					1.5 Ec ($\text{cm} \cdot \text{kg/cm}^2$)				
第 1 層	0.35	0.275	0.20	0.125	0.05	(0.9) 0.90	(0.75) 0.75	(0.5) 0.50	(0.25) 0.25	(0.1) 0.10	2.5	2.0	1.5	1.0	0.5
2	0.275	0.238	0.20	0.162	0.125	(0.5) 0.70	(0.5) 0.625	(0.5) 0.50	(0.5) 0.375	(0.5) 0.30	2.0	1.75	1.5	1.25	1.0
3	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	(0.1) 0.50	(0.25) 0.50	(0.5) 0.50	(0.75) 0.50	(0.9) 0.50	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
4	0.125	0.162	0.20	0.238	0.275	0.30	0.375	0.50	0.625	0.70	1.0	1.25	1.5	1.75	2.0
5	0.05	0.125	0.20	0.275	0.35	0.10	0.25	0.50	0.75	0.90	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5

() は 3 層の場合

である。

表1は供試体全体に加えるエネルギーを $0.2E_c$, $0.5E_c$, $1.5E_c$ の3種とし、締固め層順に加えたエネルギーを一覧表として示したものである。5層構成の場合第3層（3層構成の場合第2層）の中間層を基準のエネルギーとし、その上下の層のエネルギーを変化させた。この締固めエネルギーの変化は、供試体の下（上）層部が密詰めで上（下）層部がゆる詰めの場合の圧縮強度に与える影響を想定している。

3. 実験結果および考察

3.1 締固め方法の相異と圧縮強度・締固め密度の関係

図3, 図4, 図5は, 表1にもとづいて得られた実験結果である。タテ軸の軸差応力 ($\sigma_1 - \sigma_3$), 湿潤密度 γ_t に対してヨコ軸は5層目の E_c を示すので, ヨコ軸が, それぞれ $0.2E_c$, $0.5E_c$, $1.5E_c$ の場合は, 各層同一締固めエネルギーを加えた標準の締固め方法といえる。

図3, 図4, 図5の場合, 締固め方法の相異によって, いずれも圧縮強度と密度は変化し, その最大値を得る条件は, 5層目の締固めエネルギーが, それぞれ $0.275E_c$, $0.75E_c$, $2.0E_c$ の附近である。このことは, すでに締固められた下層部は, 上層部の締固めエネルギーの影響を受け, 更に締固められるものと考えられる。この現象は, 下層部より上層部の締固めエネルギーの大きい場合に示されたが, 締固めエネルギーの差がより大きくなると, 5層目の $E_c = 0.35, 0.9, 2.5$ の場合に見られるように圧縮強度・密度に与える効果が減少する。

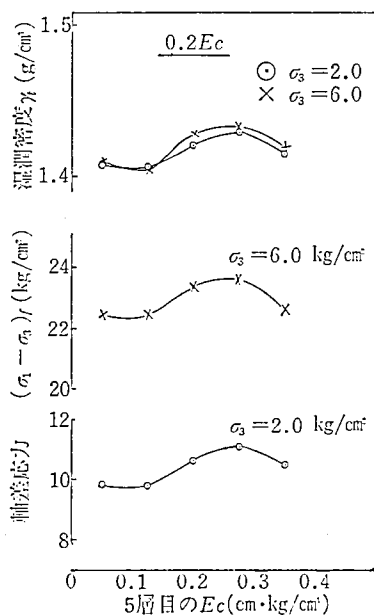


図3 0.2 E_c における締固め方法の相異と強度・密度の関係

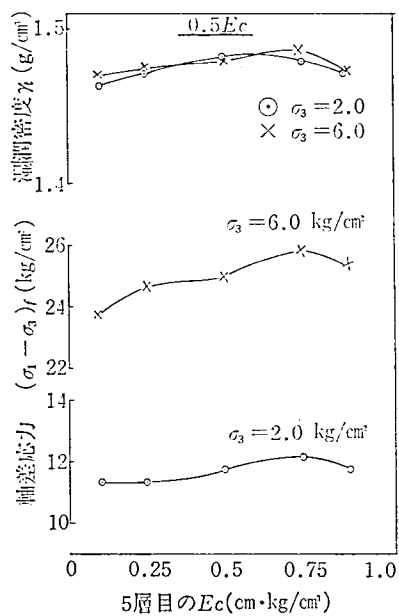


図 4 0.5 E_c における締固め方法の相異と強度・密度の関係

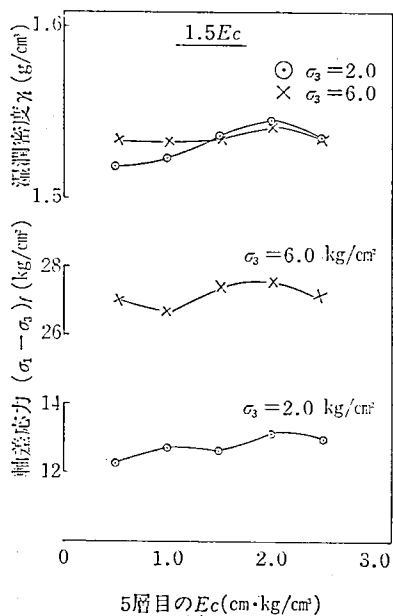


図 5 1.5 E_c における締固め方法の相異と強度・密度の関係

3.2 締固めエネルギー・密度と粘着力・セン断抵抗角の関係

図6, 図7, 図8 に締固めエネルギー $0.2Ec$, $0.5Ec$, $1.5Ec$ の場合の粘着力とセン断抵抗角の関係を示す。いずれも, 図3, 図4, 図5 の $\sigma_3=2.0 \text{ kg/cm}^2$, $\sigma_3=6.0 \text{ kg/cm}^2$ より求めたものである。図9は締固めエネルギーと圧縮強度・粘着力・セン断抵抗角の関係で, 各層同一締固めエネルギーの場合(標準締固め)の値を示す。但し, 点線の $C \cdot \phi$ は平均値である。締固めエネルギーの増加にともない粘着力の変化は殆どみられないが, セン断抵抗角の増加はいちじるしい。図2を参照することにより, 当然のことながら, 粗粒材料の密度増加はセン断抵抗角の増加に結びついている。

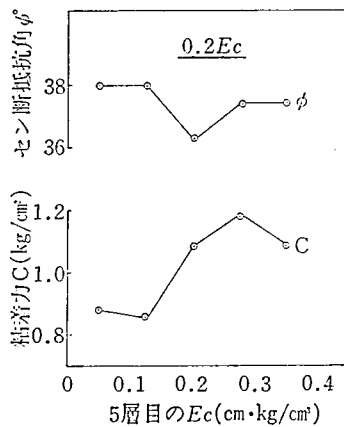


図6 締固め方法の相異と $C \cdot \phi$ の関係 ($0.2Ec$)

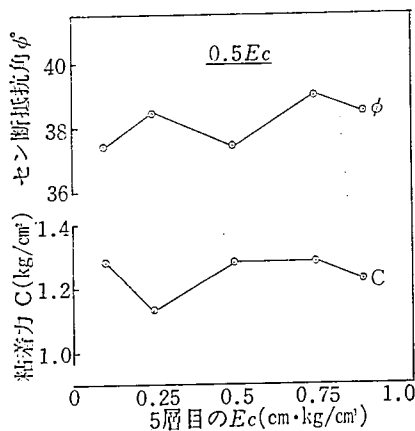


図7 締固め方法の相異と $C \cdot \phi$ の関係 ($0.5Ec$)

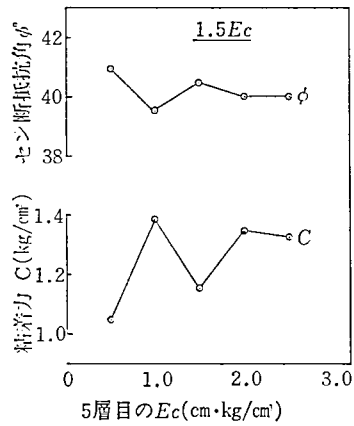


図 8 締固め方法の相異と $C \cdot \phi$ の関係 (1.5 E_c)

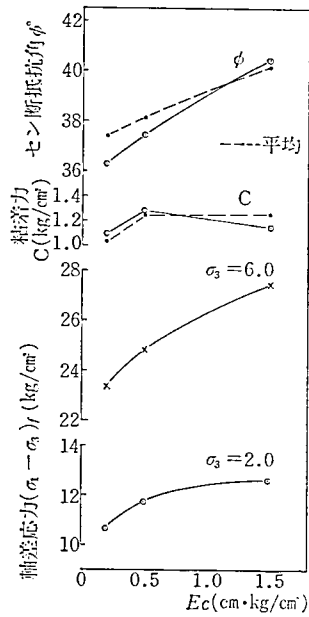


図 9 締固めエネルギーと強度・ $C \cdot \phi$ の関係

3.3 原材料と破碎された材料の比較

粗粒材料は、締固め試験・圧縮試験により、その程度は異なっても破碎される。角ばっている碎石を原材料とすると、締固めや圧縮によって破碎された材料は若干丸味をおび、破碎のため粒度分布も原材料と異なる。

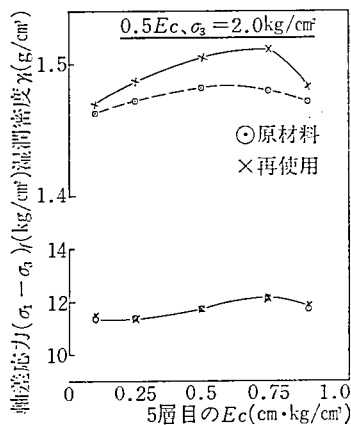


図 10 0.5 E_c における原材料と再使用による強度・密度の比較

図 10 は、本実験により破碎された材料を、原材料と同一の、図 1 に示す粒度分布に再配合し、0.5 E_c , $\sigma_3 = 2.0 \text{ kg}/\text{cm}^2$ のもとで図 4 に示す場合と同一の実験を行ない比較した結果である。再使用材料の場合、圧縮強度は殆ど原材料の場合と変わらないが、密度は増加している。このことは、粒子の形状が原材料より丸くなり、詰まり易くなったためであり、また、密度の増加分によって得られるべき、かみ合わせ抵抗の増加と、粒子形状の変化による減少分が相殺されたものと考えられる。

3.4 締固め層数と圧縮強度・密度の関係

図 11 は、層数を 2, 3, 5 層に変えて、0.5 E_c の同一締固めエネルギーを供試体に与えた場合の圧縮強度と密度の関係である。(いずれも再使用材料)。5, 3, 2 層の順に圧縮強度と密度は低下する。また、3 層の場合も締固め方法の相異と圧縮強度の関係は 5 層の場合と同じ傾向を示している。

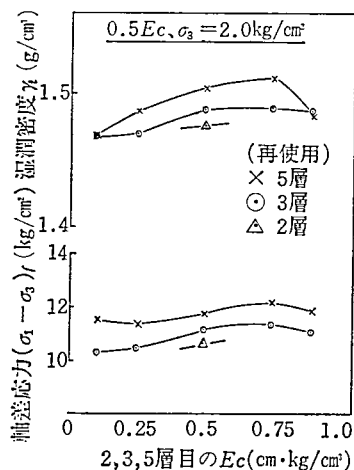


図 11 層数の変化と強度・密度の関係

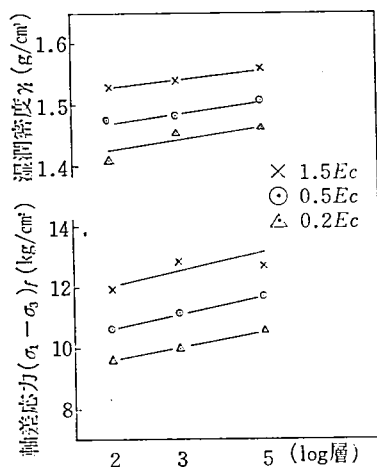


図 12 層数の変化に対する強度・密度の関係

図 12 に、 $0.2Ec$ 、 $0.5Ec$ 、 $1.5Ec$ についての圧縮強度と密度の関係を示す（各層同一エネルギーの場合）。

以上から、5 層までの範囲では、同一締固めエネルギーで締固めた場合、層数の多い方が圧縮強度・密度も大きいといえる。

3.5 締固めおよび圧縮による粒子の破碎

図 13、図 14、図 15 は、 $0.2Ec$ 、 $0.5Ec$ 、 $1.5Ec$ のエネルギーで締固めた供試体の圧縮

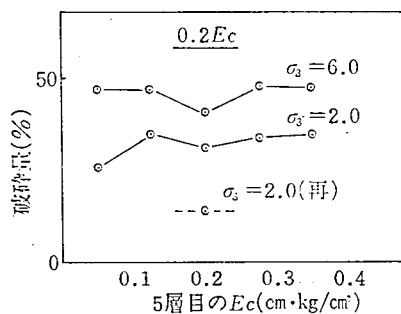


図 13 $0.2Ec$ における破碎量

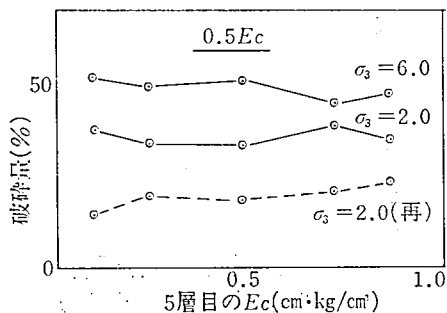


図 14 $0.5Ec$ における破碎量

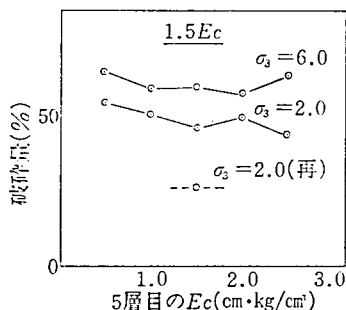


図 15 1.5 Ec における破砕量

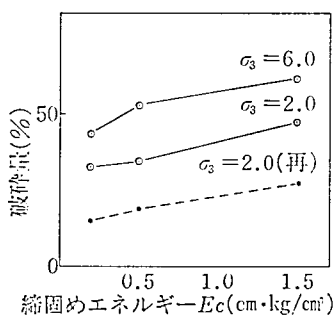


図 16

試験後の破砕量である。ここで、破砕量とは、図 1 の配合粒度分布に対して、圧縮試験後の 2.0, 4.76, 9.52, 19.1, 25.4, 38.1 mm フルイ通過率変化の合計値である。締固め方法の相異による破砕量の変化は明らかでないが、側圧の大小および原材料と破砕後の再使用材料の場合では明らかに破砕量が異なる。

図 16 は図 13, 図 14, 図 15 の各層同一締固めエネルギーの結果をまとめたものである。締固めエネルギーが増すと破砕量も増す。側圧が増すと破砕量も増すが、このことから、粒子の破砕には締固めによって生ずる破砕と圧縮過程によって生ずる破砕があり、圧縮中に生ずる破砕は側圧の影響を受けることがわかる。また、締固め、圧縮により破砕過程をへた再使用材料の破砕量は原材料にくらべて少ない。

4. む す び

大型三軸圧縮試験による粗粒材料の力学試験に関して、基礎的な検討を行なったが、得られた結果を要約すれば下記のようになる。

供試体作製時の締固めエネルギーを層ごとに变化させると、締固め密度・圧縮強度ともに大きくなる条件がある。この条件は各層同一締固めエネルギー（標準締固め）の場合より、上層部に対する締固めエネルギーを大きくした場合である。（図 3, 図 4, 図 5）

締固めエネルギーの増加は密度の増加となるが、力学的には粘着力には殆ど影響せず、せん断抵抗角の増加となって示される。（図 9）

原材料と再使用の材料では、締固め密度・破砕量が異なることから、破砕の程度・岩質・粒度分布によっては、当然、圧縮強度への影響も予想される。(図 10, 図 13, 図 14, 図15, 図 16)

同一締固めエネルギーであっても層数によって締固め密度・圧縮強度は異なる。

粒子の破砕は供試体作製時の締固め試験と圧縮試験により生じ、後者の破砕量は側圧の大きさに影響される。(図 16)

今後の課題として、岩質、粒度分布などをかえて、力学特性・破砕についての検討を予定している。